

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Análise e Aplicação de Métodos para o Cálculo da Resistência de Terra em Sistemas com N Eléktodos Instalados em Solos Heterogéneos

Ana José Martins Flores

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: José Rui da Rocha Pinto Ferreira

Co-orientador: António Machado e Moura & José Carlos Alves

8 de setembro de 2014

A Dissertação intitulada

***“Análise e Aplicação de Métodos para o Cálculo da Resistência de Terra em
Sistemas com N Eléktrods Instalados em Solos Heterogéneos”***

foi aprovada em provas realizadas em 08-10-2014

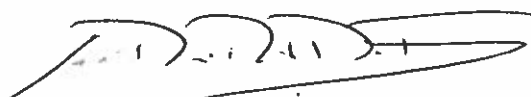
o júri



Presidente **Professor Doutor Helder Filipe Duarte Leite**
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professora Doutora Fernanda de Oliveira Resende
Professora Auxiliar da Universidade Lusófona



Professor Doutor José Rui da Rocha Pinto Ferreira
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.



Autor - Ana José Martins Flores

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

O dimensionamento de um sistema de terra é uma das prioridades centrais aquando do projeto de uma qualquer instalação elétrica. Este sistema deverá permitir o escoamento de correntes de defeito para o solo, garantindo assim a segurança das pessoas e da própria instalação.

Este escoamento é efetuado através de elétrodos de terra, cujo objetivo é ser o elo de ligação entre o circuito e o solo com a menor resistência possível.

Assim, as duas principais variáveis no cálculo da resistência de terra são a resistividade do solo e os elétrodos. Considera-se então determinante perceber o comportamento de cada uma isoladamente, bem como a sua influência no valor final da resistência de terra.

Relativamente à resistividade do solo, é importante perceber que, na maioria dos casos, este não é homogéneo e como tal o seu valor é muito imprevisível. No que diz respeito aos elétrodos, a influência destes no valor da resistência de terra está diretamente relacionada com as suas dimensões e características de enterramento.

Posto isto, este trabalho visa, essencialmente, a realização de uma detalhada revisão do estado da arte neste âmbito, ou seja, na implementação de sistemas de terras compostos por N elétrodos, instalados em solos heterogéneos, e a sua verificação através da aplicação dos vários métodos encontrados.

Salienta-se ainda o facto de se ter adaptado um dos métodos estudados, uma vez que não cumpria todos os requisitos para ser aplicado no caso de estudo, e os resultados obtidos por este, se encontrarem na mesma ordem de grandeza dos restantes métodos. Assim, essa adaptação, aliada ao facto de ser computacionalmente menos complexa, revela-se uma forte aposta para a obtenção do valor da resistência de terra à priori da instalação.

Palavras-chave: Sistemas de Terra; Resistividade; Resistência de terra; Elétrodos.

Abstract

The dimensioning of a grounding system is one of main features of any electrical installation project. The system has to be able to drain fault currents towards the ground protecting people and equipment. The fault currents flow through grounding electrodes, which are linking elements between the electrical circuit and the ground path with the lowest possible resistance.

The two mathematic variables of resistance are the soil resistivity and electrodes . It is then important to understand the behaviour and implications of each of them independently into the overall ground resistance value.

In most of the cases, the soil resistivity is very hard to establish due to its heterogeneity. On the other hand, the influence of the resistivity of grounding electrodes to the overall ground path resistance is function of its dimensions and interred characteristics.

Knowing that, the essential aim of the dissertation was: (1) perform a thorough state of the art review about implementation of soil systems integrated with N electrodes that are installed in heterogenic soils and (2) the verification of the overall resistivity by applying several different benchmark methods.

Important to note that one of the benchmark methods was customised during this dissertation with the intent to fulfil all the case study application requirements. The results obtained by the customised method have demonstrated to be at the same order of magnitude of other methods. Thus, together with the fact that this method is much less complex in terms of computation, the method has position itself as a very valuable method to be used when measuring ground electrical resistance for this kind of electrical installations.

Keywords: Grounding Systems; Soil resistivity; Grouding Resistance; Rods.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador Professor José Rui Ferreira, pela forma como orientou o meu trabalho, por me transmitir os melhores e mais úteis ensinamentos e pela utilidade das suas recomendações. Por tudo isto e muito mais, estou-lhe muito grata.

Ao Professor Doutor António Machado e Moura, pelas palavras de ânimo e confiança transmitidas, pelo constante auxílio e, acima de tudo, pela amizade demonstrada, que lhe é tão característica.

Ao Eng. José Carlos Alves, da Flosel, pela motivação transmitida desde início e pelo facto de se mostrar sempre disponível para ajudar.

À Eng^a. Andreia do LABELEC pelo encorajamento logo no primeiro contacto que estabelece-mos, pelas respostas sempre tão animadores quando solicitei a sua ajuda e por me ter encaminhado para o Eng^o Nuno, também do LABELEC, que representou uma enorme ajuda no desenvolvimento deste trabalho. Pela documentação que forneceu, pela rapidez de resposta sempre que o importunei e pelo incessante apoio, o meu sincero Obrigada.

Não posso deixar de agradecer também a todos os engenheiros da Flosel pela constante disponibilidade em ajudar.

Aos meus pais por serem os principais responsáveis por estar agora a acabar este percurso académico, por me terem proporcionado sempre tudo o que precisei, pelo apoio e incentivo para superar qualquer adversidade, pelos valores que me passaram, por serem o motivo daquilo que sou hoje.

Às minhas irmãs pela paciência nesta fase mais *stressante* durante a realização deste trabalho e acima de tudo por serem sempre o meu porto seguro.

Ao Mota, por caminhar comigo lado a lado ao longo destes últimos 5 anos, pela segurança e ânimo que me transmitiu nos momentos menos bons e por com ele poder partilhar todas as vitórias.

À Mafalda por ter sido um apoio constante no desenvolvimento deste trabalho, pela companhia, dedicação, por me ajudar a levantar nos momentos de desânimo, por festejar comigo a mínima conquista, mas sobretudo pela sincera amizade. Do fundinho do meu coração, Muito Obrigada.

A todos os meus amigos, que me acompanharam ao longo do meu percurso académico, em especial ao Sabino, Checo, Sónia, Nuno, Bas, Leonor, Joana, Marta, Daniel, Xoto, Filas e Ni.

Muito Obrigada.

Ana José Martins Flores

*“Our greatest weakness lies in giving up.
The most certain way to succeed is always to try just one more time.”*

Thomas A. Edison

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Estrutura da Dissertação	2
2	Segurança nos Sistemas de Terra	5
2.1	Efeitos da corrente no Corpo Humano	5
2.1.1	Intensidade e duração do defeito	5
2.1.2	Frequência	6
2.1.3	Resistência do corpo humano	6
2.1.4	Percurso da corrente pelo corpo humano	7
2.2	Corrente Tolerável pelo Corpo Humano	7
2.3	Tensão de Passo e Toque Tolerável	8
2.3.1	Tensão de Passo	9
2.3.2	Tensão de Toque	10
2.4	Resumo e conclusões	11
3	Resistividade do Solo	13
3.1	Definição	13
3.2	Fatores que influenciam a resistividade do solo	14
3.3	Medição da Resistividade	16
3.3.1	Medição por amostragem	16
3.3.2	Medição local	18
3.3.2.1	<i>Wenner</i>	19
3.3.2.2	<i>Schlumberger</i>	20
3.3.2.3	<i>Driven Rod</i>	21
3.4	Estrutura do Solo	22
3.4.1	Modelo do solo uniforme	22
3.4.2	Solos com duas camadas	23
3.4.2.1	Método geral	23
3.4.2.2	Método gráfico	24
3.5	Conclusão	27
4	Resistência de Terra	29
4.1	Limites para o valor da Resistência de Terra	30
4.2	Determinação da Resistência de Terra	30
4.3	Métodos de Medição da Resistência de Terra	32
4.3.1	Método da queda de potencial (três terminais)	32
4.3.2	Método Seletivo	33

4.3.3	Método direto (dois terminais)	34
4.3.4	Método do triângulo (método de Kolrausch)	34
4.4	Métodos para o cálculo da Resistência de Terra	35
4.4.1	<i>Schwarz</i>	35
4.4.2	<i>Nahman</i>	36
4.4.2.1	Novo estudo de <i>Nahman</i>	39
4.4.3	Chow et al.	41
4.5	Resumo ou Conclusões	43
5	Técnicas para Melhorar a Resistência de Terra	45
5.1	Técnicas baseadas na alteração das características dos elétrodo	45
5.1.1	Aumento do número de elétrodo em paralelo	45
5.1.2	Aumento da profundidade de enterramento dos elétrodo	47
5.1.3	Aumento da secção dos elétrodo	47
5.2	Técnicas para melhorar a resistividade do solo	48
5.2.1	Tratamento químico do solo	48
5.2.2	Tratamento físico do solo	49
5.3	Outras técnicas sob estudo	50
5.3.1	Provocação de uma explosão na zona de enterramento dos elétrodo	50
5.3.2	Escavação de um poço profundo	51
5.4	Resumo e Conclusões	52
6	Aplicação dos métodos de cálculo da Resistência de Terra	55
6.1	Resistividade Aparente	55
6.1.1	Resultados	56
6.1.1.1	Variação da resistividade com o número de medições	56
6.1.1.2	Influência de cada camada	57
6.1.1.3	Curvas de <i>Sunde</i>	58
6.2	Resistência de Terra	59
6.2.1	Análise Comparativa	59
6.2.2	Resultados	60
6.2.2.1	Variação da resistência de Terra com o número de elétrodo	60
6.2.2.2	Variação da resistência de Terra com o tamanho dos elétrodo	61
6.2.2.3	Variação da resistência de Terra com o raio dos elétrodo	63
6.2.2.4	Variação da resistência de Terra com a área ocupada pelos elétrodo	65
6.2.2.5	Variação da resistência de Terra com a profundidade de enterramento dos elétrodo	66
6.2.3	Aplicação em <i>Excel</i>	67
6.3	Resumo ou Conclusões	68
7	Conclusões e Trabalhos Futuros	71
7.1	Trabalhos Futuros	72
	Referências	75

Lista de Figuras

2.1	Corrente de fibrilação em função do peso corporal	8
2.2	Tensão de Passo	9
2.3	Tensão de Toque	10
3.1	Ilustração de um cubo de dimensões unitárias	13
3.2	Efeito da humidade, temperatura e sais dissolvidos na água na resistividade do solo	15
3.3	Medição da resistividade em laboratório	17
3.4	Esquema para a realização de várias medições	18
3.5	Esquema do princípio de medição do método de <i>Wenner</i>	19
3.6	Esquema do princípio de medição do método de <i>Schlumberger</i>	20
3.7	Esquema do princípio de medição do método de <i>Driven Rod</i>	21
3.8	Representação de um modelo de solo uniforme	22
3.9	Esquema de um solo com duas camadas de diferentes resistividades	23
3.10	Curvas de <i>Sunde</i> para um solo com duas camadas	25
4.1	Circuito implementado para a medição pelo método em análise	32
4.2	Sobreposição entre as áreas de interferência os dois elétrodo	32
4.3	Variação da tensão com a distância do elétrodo P	33
4.4	Circuito implementado para a medição pelo método em análise	34
4.5	Circuito implementado para a medição pelo método em análise	34
4.6	Circuito implementado para a medição pelo método em análise	35
4.7	Curvas características do fator k_1	36
4.8	Elétrodo enterrados apenas na primeira camada	37
4.9	Curvas características do fator k_p	38
4.10	Elétrodo enterrados a perfurar as duas camadas	38
4.11	Curvas características do fator k'_p	39
4.12	Ilustração dos elétrodo enterrados nas duas camadas	41
5.1	Variação da resistência de terra com o número de elétrodo verticais instalados em paralelo ($1\text{ pol} = 0,0254\text{m}$)	46
5.2	Variação da resistência de terra com o número de elétrodo em paralelo ($1\text{FT} = 0,3048\text{m}$)	46
5.3	Variação da resistência de terra com a profundidade de enterramento dos elétrodo	47
5.4	Variação da resistência de terra com o diâmetro dos elétrodo	48
5.5	Ilustração de como efetuar um tratamento químico no solo	48
5.6	Variação da resistência de terra ao longo do ano, para um solo sem tratamento e outro com tratamento	49
5.7	Ilustração da aplicação de bentonite à volta do elétrodo	49
5.8	Resistividades características do GEM e da Bentonite	50

5.9	Ilustração do solo após a explosão	50
5.10	Esquema representativo das fissuras do solo	51
5.11	Diagrama representativo do movimento de uma molécula de água	52
5.12	Região do solo saturada com água devido à presença do poço	52
6.1	Variação da resistividade aparente com o número de medições efetuadas	56
6.2	Variação da resistividade aparente com o fator de reflexão	57
6.3	Ampliação da zona assinalada das curvas de <i>Sunde</i>	58
6.4	Variação da resistência de Terra com o número de elétrodos (Método de <i>Schwarz</i>)	61
6.5	Variação da resistência de Terra com o número de elétrodos para os restantes métodos	61
6.6	Variação da resistência de Terra com o tamanho dos elétrodos (Método de <i>Schwarz</i>)	62
6.7	Variação da resistência de Terra com o tamanho dos elétrodos para os restantes métodos	62
6.8	Ilustração da colocação de dois elétrodos verticais unidos	63
6.9	Variação da resistência de Terra com o raio dos elétrodos (Método de <i>Schwarz</i>) .	64
6.10	Variação da resistência de Terra com o raio dos elétrodos para os restantes métodos	64
6.11	Variação da resistência de Terra com área ocupada pelos elétrodos (Método de <i>Schwarz</i>)	65
6.12	Variação da resistência de Terra com área ocupada pelos elétrodos para os restantes métodos	66
6.13	Variação da resistência de Terra com a profundidade de enterramento dos elétrodos, para o método de <i>Chow</i>	67
6.14	Ilustração da folha de cálculo criada em <i>Excel</i>	68

Lista de Tabelas

3.1	Resistividade dos terrenos de acordo com a sua natureza	14
4.1	Valores máximos para a resistência de terra	30
4.2	Fórmulas para calcular a resistência de terra	31
6.1	Variáveis de entrada para cada um dos métodos	59
6.2	Valores das variáveis fixas no decorrer do estudo	60
6.3	Valores das variáveis fixas no decorrer do estudo	62
6.4	Valores das variáveis fixas no decorrer do estudo	63
6.5	Valores das variáveis fixas no decorrer do estudo	65
6.6	Valores das variáveis fixas no decorrer do estudo	66

Abreviaturas e Símbolos

AC	Corrente Alternada
DC	Corrente Contínua
N	Número de elétrodo
K	Fator de reflexão entre duas camadas
ρ	Resistividade do solo
ℓ	Tamanho do elétrodo
a	Raio do elétrodo
A	Área ocupada na instalação
h_p	Profundidade de enterramento
H	Profundidade da 1ª camada

Capítulo 1

Introdução

Hoje em dia, a aposta no estudo de sistemas de terra fundamenta-se pela prioridade central de, aquando de qualquer instalação elétrica, assegurar a segurança de indivíduos e ambientes circundantes, bem como dos próprios equipamentos.

Os sistemas de terra são portanto indispensáveis em qualquer instalação elétrica, desde simples instalações domésticas em baixa tensão até às grandes obras em alta e muito alta tensão. Estes devem garantir o escoamento de correntes de choque provenientes de descargas atmosféricas, ou da atuação da aparelhagem de manobra, assim como correntes de curto-circuito.

No entanto, uma das maiores dificuldades desta temática surge da incerteza associada à resistividade do solo. A resistividade de um solo, considerada fator chave no decorrer do dimensionamento de um sistema de terras, varia de acordo com a sua composição natural, quantidade de água presente e percentagem de sais dissolvidos, com a temperatura, entre outros. Por outro lado, um solo dificilmente é composto apenas por uma camada homogénea. Por esse mesmo motivo, e de forma a permitir o projeto e execução de um sistema de terras apropriado, é indispensável tratar o solo como um meio com mais do que uma camada e por isso, heterogéneo.

Os principais intervenientes de qualquer sistema de terra denominam-se por elétrodos. Estes constituem, de forma resumida, condutores de energia. Um conjunto de elétrodos, disposto segundo determinadas configurações e ocupando uma determinada área compõem um típico sistema de terras e ditam o valor de uma resistência, denominada resistência de terra. Esta resistência, e de acordo com o que foi referido no início deste capítulo, deverá pertencer a uma gama específica de valores a fim de cumprir os requisitos de segurança exigidos.

O valor desta resistência pode então ser manipulado a partir da escolha apropriada do número de elétrodos, do seu tamanho e secção, da sua profundidade de enterramento, e da área que ocupam. Assim, uma simulação à priori deste valor, tendo em conta o solo sob o qual o sistema de terra será instalado, corresponde a um estudo considerado de valor e com interesse direto para uma otimização tanto dos valores de resistência de terra como dos custos associado à instalação de um sistema deste tipo.

Durante mais de 50 décadas alguns autores dedicaram-se com o objetivo de formular equações como técnicas de cálculo para sistemas com N elétrodos em solos de duas camadas. No entanto, e

depois de uma vasta pesquisa bibliográfica, esta temática demonstra-se ainda pouco objetiva e as diferentes soluções encontram-se dispersas.

Serve portanto esta dissertação para situar o estudo e descrevê-lo, seguindo um sentido cronológico de autores. Por outro lado, permite uma análise profunda e aplicação destes métodos. Foi então possível, a nível computacional, e face a diferentes cenários relativos às resistividades presentes, avaliar o comportamento da resistência de terra para diferentes características/configurações de elétrodos.

1.1 Objetivos

A presente dissertação e, como o próprio título indica, tem como principal objetivo o estudo e aplicação de metodologias de cálculo de resistências de terra em solos heterogêneos e em sistemas compostos por N elétrodos. No entanto, para atingir este objetivo foi necessário estipular progressivas metas.

Numa primeira fase, foi crucial um estudo, a um nível mais básico, de tudo o que está relacionado com redes de terra, uma vez que este tema não é alvo de um estudo profundo a nível académico. De entre estes objetivos destacam-se os seguintes:

- Enquadramento geral com o tema, assimilando a sua importância no nosso dia-a-dia;
- Perceção de conceitos primários do tema como Resistência de Terra, Resistividade do Solo, Elétrodos, entre outros.

Numa fase posterior, já com os conceitos bastante consolidados, pretende-se que esta dissertação cumpra os seguintes objetivos:

- Estudo de solos com duas camadas de diferentes resistividades;
- Obtenção de metodologias para o cálculo da resistência de terra;
- Aplicação dos vários métodos de cálculo para diferentes cenários;
- Criação de uma folha de cálculo em *Excel* de suporte ao estudo;

1.2 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em sete capítulos.

O primeiro capítulo, e no qual se insere este ponto, tem como principal objetivo realizar uma *Introdução* geral ao trabalho realizado. Parte de uma breve descrição do tema, no qual é salientada também a sua relevância e os principais objetivos a cumprir. São ainda enunciadas as ferramentas computacionais utilizadas no desenvolvimento do trabalho e por fim é apresentado este ponto, relativo à estrutura da dissertação.

No segundo capítulo, denominado *Segurança nos Sistema de Terra*, são apresentados diversos pontos que comprovam a importância deste tema. É demonstrada qual a corrente máxima tolerada pelo corpo humano e ainda os seus principais efeitos. Por fim, são caracterizados os conceitos de Tensão de Passo e de Toque.

A análise do estado da arte relativa à *Resistividade do Solo* é realizada no terceiro capítulo. É efetuada uma descrição do conceito, bem como os principais fatores que a influenciam, e são apresentados os diferentes métodos para a sua medição. No final, são estudadas diferentes formas de tratar um solo de duas camadas, sendo este um dos principais pontos desta dissertação.

A segunda temática mais importante neste trabalho é a *Resistência de Terra* e é no quarto capítulo que é realizada uma pormenorizada revisão do estado da arte, no que a este tema diz respeito. Após explicado o conceito e algumas regras técnicas, são apresentadas as diversas formas de determinar a resistência de terra para vários tipos e configurações de eléktodos. Este estudo teórico é complementado com a apresentação de métodos de medição da resistência de terra no próprio local da instalação. Por fim, são apresentados, por ordem cronológica, os vários métodos para o cálculo da resistência de terra em sistemas com N eléktodos e instalados em solos heterogéneos.

Com a recorrente preocupação em obter valores de resistência de terra admissíveis, foram estudadas diversas formas de a melhorar. Estas dividem-se essencialmente em dois tipos, desde alterações na configuração e estrutura dos eléktodos, a modificações no próprio solo, de forma a melhorar a sua resistividade e, consequentemente, diminuir a resistência de terra. Estas medidas são apresentadas no quinto capítulo, designado *Técnicas para melhorar a Resistência de Terra*.

No sexto capítulo são apresentados os resultados do estudo realizado após a extensa pesquisa bibliográfica. Também este capítulo foi dividido nas duas principais temáticas que caracterizaram este trabalho, a resistividade do solo e a resistência de terra. Relativamente à primeira foi estudado como é que esta varia à medida que se realizam mais medições e ainda a influência que cada camada, num solo heterogéneo, tem no seu valor final. No que diz respeito à resistência de terra são testadas as técnicas apresentadas no capítulo 5 para três dos métodos apresentados no capítulo 4. Salienta-se o facto de um dos métodos ter sido adaptado e os resultados obtidos serem bastante semelhantes aos dos outros métodos.

O sétimo e último capítulo, serve essencialmente para apresentar as principais conclusões retiradas no decorrer do trabalho. De ressaltar, que é ainda feita uma referência a possíveis trabalhos que poderão vir a ser realizados no futuro, no âmbito desta vasta e importante temática que são os Sistemas de Terra.

Capítulo 2

Segurança nos Sistemas de Terra

Este capítulo serviu para realçar a relevância dos Sistemas de Terras, uma vez que aborda uma temática muito importante, a segurança das pessoas. Isto porque, as questões relacionadas com a segurança, tanto de pessoas, como de equipamentos, são as mais preocupantes aquando do projeto e implementação de sistemas de terra.

2.1 Efeitos da corrente no Corpo Humano

A introdução de uma corrente no corpo humano, poderá resultar em várias alterações desde ferimentos ligeiros até mesmo danos mortais. Estes efeitos dependem de diferentes fatores tais como:

- Intensidade e duração do defeito;
- Frequência da corrente elétrica;
- Resistência do corpo humano;
- Percurso da corrente pelo corpo humano.

2.1.1 Intensidade e duração do defeito

Tal como esperado, os efeitos da corrente elétrica no corpo humano são mais perigosos quanto maior a intensidade e a duração da mesma. Os efeitos mais comuns, por ordem crescente da intensidade de corrente, são: ligeiro formigueiro, contração muscular, inconsciência, fibrilação ventricular, bloqueio das vias respiratórias e queimaduras [1]. Assim, aquando do dimensionamento de um sistema de terras, o objetivo passa por limitar as correntes que possam circular no corpo humano para que nunca se verifiquem estes últimos e mais graves efeitos. Para ter uma ideia dos valores da corrente que atravessam o corpo durante a ocorrência de um defeito, *Dalziel* elaborou um estudo, presente em [1] do qual concluiu o seguinte:

- Uma corrente de 1mA é o limiar da perceção e traduz-se apenas numa ligeira sensação de formigueiro entre as mãos ou os dedos;

- Correntes entre 1 e 6 mA não impossibilitam uma pessoa de controlar os seus músculos e assim libertar um objeto que esteja a ser percorrido por uma corrente;
- Correntes entre 9 e 25 mA são já consideradas correntes dolorosas, que dificultam e podem até mesmo impossibilitar uma pessoa de libertar um objeto energizado. Para correntes superiores poderão resultar contrações musculares e consequentemente tornar a respiração difícil. Estes efeitos são, normalmente, passageiros e resolúveis;
- Correntes entre 60 mA e 100 mA são o limite para a ocorrência de fibrilação ventricular, paragem cardíaca e bloqueio das vias respiratórias e podendo resultar mesmo em morte.

O mesmo autor relacionou a energia do choque elétrico tolerada por grande parte das pessoas com a duração do defeito e a corrente que este origina no corpo humano através da seguinte equação:

$$S_B = I_B^2 \times t_s \quad (2.1)$$

Onde,

S_B representa uma constante empírica relacionada com a energia de choque elétrico tolerada por uma determinada percentagem de uma dada população.

I_B representa a intensidade da corrente suportada pelo corpo humano [A];

t_s representa o tempo a que o corpo está exposto a essa mesma corrente [s];

2.1.2 Frequência

O ser humano é bastante vulnerável aos efeitos da corrente elétrica a frequências de 50 ou 60 Hz, sendo que uma corrente de 0,1 A pode ser fatal. Pesquisas indicam que o corpo humano consegue tolerar correntes AC com frequências na ordem dos 25 Hz e correntes DC 5 vezes superiores. Estudos de *Dalziel* revelam que para frequências entre 3000 e 10000 Hz o corpo humano pode tolerar correntes mais elevadas, como é também exemplo o caso de descargas atmosféricas.

2.1.3 Resistência do corpo humano

O corpo humano pode ser aproximado a uma resistência, quando sujeito a uma corrente contínua ou alternada a 50 ou 60 Hz. O caminho que a corrente percorre é, normalmente, considerado de uma mão para ambos os pés, ou de um pé para o outro. A resistência interna do corpo é cerca de 300 Ω e, incluindo a pele apresenta valores na gama dos 500 a 3000 Ω . Mais uma vez, *Dalziel* realizou vários estudos com o intuito de determinar as correntes que o corpo humano tolera a 60 Hz, com as mãos e os pés molhados com água salgada. Obtiveram-se os valores seguintes: uma corrente de 9 mA para tensões de 21 V de mão para mão e 10,2 V de mão para pés. Como

resultado as resistências obtidas mão-mão e mão-pés são, respetivamente dadas por:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{21}{0,009} = 2330\Omega \quad (2.2)$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{10,2}{0,009} = 1133\Omega \quad (2.3)$$

Assim, e assumindo alguns pressupostos, o valor da resistência do corpo humano, para qualquer percurso da corrente, será aproximado para 1000Ω .

2.1.4 Percurso da corrente pelo corpo humano

É importante ressaltar que a resistência de 1000Ω considerada, está relacionada com o caminho da corrente entre a mão e o pé ou entre os dois pés, passando através de zonas do corpo humano que incluem órgãos vitais. Normalmente é considerado que a corrente entre os dois pés é menos perigosa e o mesmo é comprovado através de vários estudos efetuados por *Loucks*. Com base nos estudos de *Loucks*, é possível considerar uma resistência superior a 1000Ω , no caso de se tratar de um percurso da corrente de pé para pé, sendo que é necessário considerar os seguintes pressupostos:

- A tensão entre os dois pés, dolorosa mas não fatal, pode resultar num fluxo de corrente que atravessasse a área do peito. O grau de perigo dependeria então da duração da falha e da possibilidade da existência de outro choque sucessivo;
- Uma pessoa pode estar a trabalhar ou a descansar numa posição inclinada no momento do defeito.

Devido aos riscos acima mencionados, é habitualmente admitida uma resistência de 1000Ω independentemente do percurso da corrente.

2.2 Corrente Tolerável pelo Corpo Humano

Com base nos resultados dos estudos efetuados por *Dalziel*, pode aferir-se que 99,5% das pessoas podem suportar com segurança, isto é, sem que ocorra fibrilação ventricular, a passagem de uma corrente com intensidade e duração determinada pela Equação 2.4:

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (2.4)$$

Sendo que k é dado pela Equação 3.12:

$$k = \sqrt{S_B} \quad (2.5)$$

Onde S_B , tal como na equação 2.1, representa uma constante empírica relacionada com a energia de choque elétrico tolerada por 99,5% de uma população.

Mais uma vez, os estudos realizados por *Dalziel* concluíram que para 99,5% das pessoas com um peso de, aproximadamente:

- 50 kg resultaria um valor de $S_B = 0,0135$ e, conseqüentemente, $k_{50} = 0,116$;
- 70 kg resultaria um valor de $S_B = 0,0246$ e, conseqüentemente, $k_{70} = 0,157$.

Aplicando a Equação 2.4 conclui-se que a corrente máxima tolerável por uma pessoa com 50 kg é de:

$$I_{B50kg} = \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.6)$$

E para uma pessoa de 70 kg:

$$I_{B70kg} = \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.7)$$

As Equações 2.6 e 2.7 estão limitadas para um tempo de contacto entre 0,03 e 3 segundos, sendo que para períodos fora desse intervalo não são aplicáveis. Na Figura 2.1, e em jeito de curiosidade, é possível observar a relação entre a corrente de fibrilação e o peso das diferentes espécies de animais quando expostos a choques elétricos durante 3 segundos.

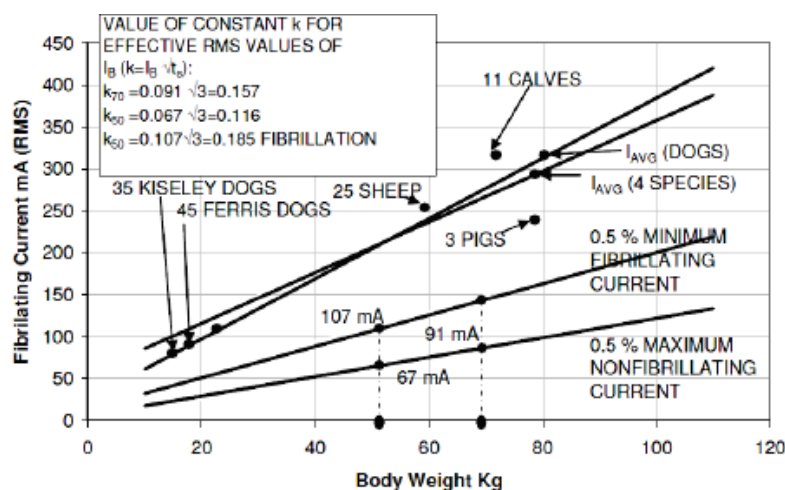


Figura 2.1: Corrente de fibrilação em função do peso corporal [1] [2]

2.3 Tensão de Passo e Toque Tolerável

Numa situação ideal, o potencial elétrico do neutro num sistema trifásico seria igual ao do solo e assim estaria garantida a segurança das pessoas quando em contacto com as estruturas metálicas

numa situação de falha. No entanto, a impedância do sistema de ligação à terra dificilmente é zero. Assim, em condições de defeito à terra haverá uma diferença de potencial entre as estruturas ligadas à terra e outros locais do solo, podendo resultar em dois tipos de situação de perigo para as pessoas:

- Se a pessoa estiver em contacto com a estrutura metálica ligada à terra e se se encontrar num local do solo que está a um potencial diferente, vai ser exposta a uma determinada tensão que irá gerar uma corrente que vai circular no seu corpo. Esta tensão denomina-se Tensão de Toque.
- No caso de a pessoa se encontrar num determinado local do solo em que os seus pés apresentam uma diferença de potencial, estará exposta a uma tensão denominada Tensão Passo.

2.3.1 Tensão de Passo

A tensão de Passo corresponde ao valor máximo da diferença de potencial entre os pés de uma pessoa (arbitrando uma distância de 1 metro entre os mesmos), que se encontre na região onde estão instalados os elétrodos de terra, a que esta poderá ser submetida, durante uma descarga de corrente.

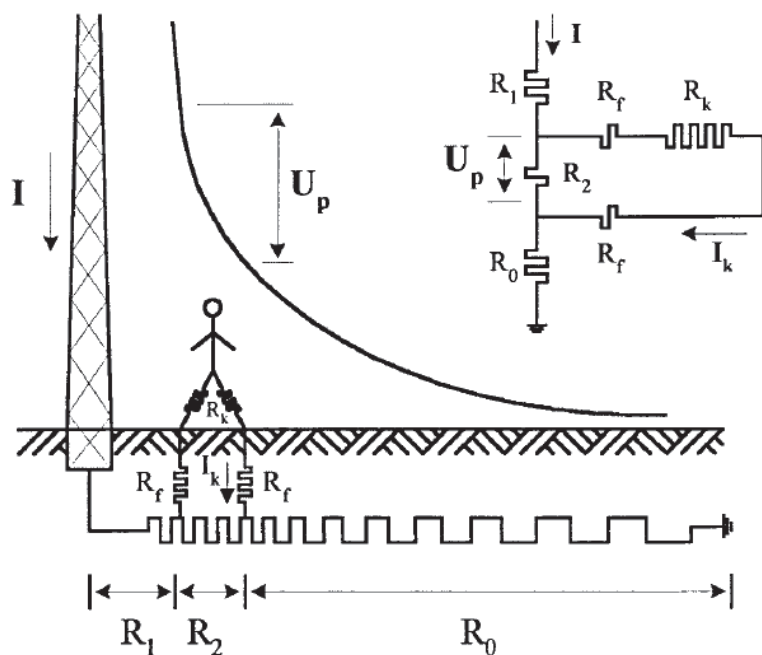


Figura 2.2: Tensão de Passo [3]

Após analisar a Figura 2.2 pode concluir-se que a Tensão de Passo Tolerável é dada pela Equação 2.8:

$$U_p = (R_k + 2R_f) \times I_k \quad (2.8)$$

Onde:

- U_p é a tensão de passo tolerável para uma pessoa (V);
- R_k é o valor da resistência do corpo humano (Ω);
- R_f é a resistência do calçado/solo (Ω);
- I_k é o valor máximo da corrente admissível no corpo humano, sem que ocorra fibrilação ventricular (A).

2.3.2 Tensão de Toque

A tensão de Toque corresponde ao valor máximo da diferença de potencial entre a mão e os pés a que uma pessoa poderá ser submetida, quando se encontra em contacto com o equipamento, durante uma descarga de corrente (assumindo uma distância de 1 metro entre o equipamento e a pessoa).

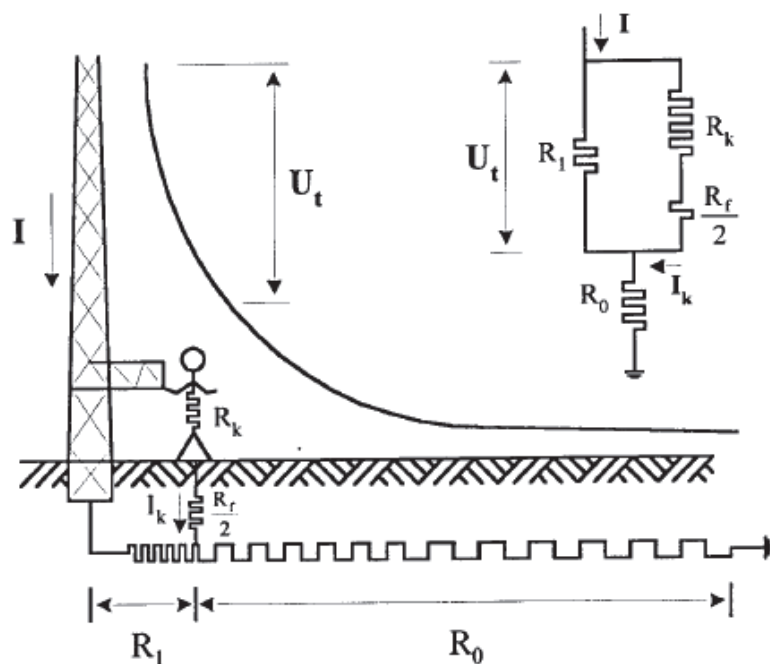


Figura 2.3: Tensão de Toque [3]

Considerando a resistência entre a mão e o ponto de contacto com o equipamento desprezável, e analisando a Figura 2.3, pode-se concluir que a Tensão de Toque Tolerável é dada pela Equação 2.9.

$$U_t = \left(R_k + \frac{R_f}{2}\right) \times I_k \quad (2.9)$$

Onde:

- U_t é a tensão de toque a que um pessoa fica sujeita quando em contacto com uma parte metálica sob tensão (V);
- R_k é o valor da resistência do corpo humano (Ω);
- R_f é a resistência do calçado/solo (Ω);
- I_k é o valor máximo da corrente admissível no corpo humano, sem que ocorra fibrilação ventricular (A).

2.4 Resumo e conclusões

No decorrer deste capítulo foram abordados diferentes pontos relativos à segurança nos sistemas de terra.

Aquando da ocorrência de um defeito, a corrente que dele resulta pode originar vários efeitos no corpo humano. Esses mesmos efeitos dependem de vários fatores como a intensidade da corrente, a duração e a frequência a que ocorreu o defeito e ainda o percurso desta no corpo humano. Nos primeiros pontos deste capítulo foram abordados todos esses fatores.

Para além de toda a teoria que envolve a temática da segurança, considerou-se importante saber calcular qual a corrente que corpo humano tolera. Neste capítulo é apresentado o resultado de um estudo de *Dalziel* que o permite fazer.

Uma vez que a resistência de terra dificilmente é zero, e como consequência, existirá uma diferença de potencial entre as estruturas metálicas ligadas à terra e outros locais do solo da qual podem resultar as chamadas tensões de toque e de passo. Para além de uma descrição das situações em que estas ocorrem são ainda apresentadas formas de as calcular.

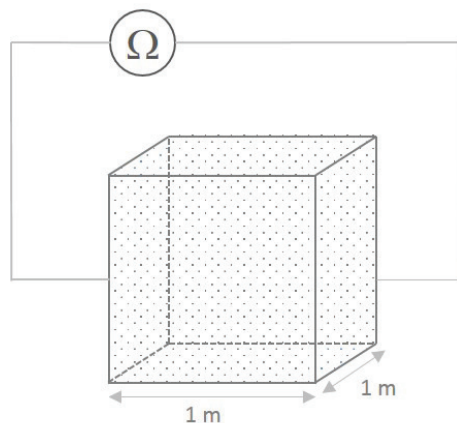
Capítulo 3

Resistividade do Solo

Tendo em conta o âmbito desta dissertação, neste capítulo serão abordados os conceitos básicos que influenciam a definição de resistividade tendo em conta os diferentes fatores, condições de medição e composição do solo sob estudo.

3.1 Definição

Para qualquer sistema de terras, a resistividade do solo é um dos parâmetros mais importantes, sendo que é a partir deste que é determinada a resistência do sistema de terras. Esta é expressa em $\Omega \cdot m$ e é dada pela resistência elétrica R medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias preenchido com a terra do solo em estudo [4,5]. Ou seja:



$$\rho = R \cdot \frac{A}{l}$$

Figura 3.1: Ilustração de um cubo de dimensões unitárias

Onde:

l representa a dimensão da aresta do cubo ($1m$);

A representa a área de uma face do cubo ($1m^2$).

3.2 Fatores que influenciam a resistividade do solo

A condução elétrica nos solos é, essencialmente, efetuada por um processo eletrolítico. Por esta mesma razão, a resistividade do solo sobe abruptamente quando a humidade presente representa menos de 15 % do peso total do mesmo [1]. A quantidade de humidade presente depende também de outras características do solo como o tipo de solo, de uma forma geral, a granulometria e a compactidade. Para além da humidade, a concentração de sais dissolvidos na água e a temperatura do solo também têm uma importante influência na sua resistividade. Seguidamente são enumerados e apresentados de forma mais detalhada os fatores anteriormente referidos.

- **Tipo de solo**—Devido ao facto de os solos não serem totalmente homogêneos, não é possível atribuir valores fixos de resistividade. Para além disso, verifica-se também que as resistividades variam consoante a localidade. Assim, são definidos intervalos de valores característicos para cada tipo de solo (Tabela 3.1) [6, 7].

Tabela 3.1: Resistividade dos terrenos de acordo com a sua natureza

Natureza dos terrenos	Resistividade (Ωm)
Terreno pantanoso	1 a 30
Lama	20 a 100
Húmus	10 a 150
Turfa húmida	5 a 100
Argila plástica	50
Mármore e argilas compactas	100 a 200
Mármore do Jurássico	30 a 40
Areia argilosa	50 a 500
Areia silicosa	200 a 3000
Solo pedregoso nu	1500 a 3000
Solo pedregoso recoberto de relva ou erva curta	300 a 500
Calcários macios	100 a 300
Calcários compactos	1000 a 5000
Calcários fissurados	500 a 1000
Xistos	50 a 300
Micaxistos	800
Granito e grés, consoante a alteração geológica	1500 a 10000
Granito muito alterado	100 a 600
Betão com 1 de cimento e 3 de inertes	150
Betão com 1 de cimento e 5 de inertes	400
Betão com 1 de cimento e 7 de inertes	500

- **Compactidade do solo**—A compactidade de um solo é um índice utilizado para determinar o grau de compactação de um material granular, não coesivo. Quanto maior o índice de compactidade menor o índice de espaços vazios. Um solo mais compacto, apresenta uma menor resistividade, uma vez que a continuidade física é maior. Por esta razão, as medições

da resistência de terra não devem ser efetuadas logo após a instalação do sistema de terras, uma vez que o solo ainda não se moldou e os resultados podem ser afetados.

- **Granulometria do solo**—Um solo é, de uma forma geral, composto por várias partículas, de diferentes dimensões. Assim, é comum efetuar uma análise granulométrica com o intuito de definir, para determinadas faixas de tamanho de grãos, a percentagem em peso que cada fração possui relativamente à massa total da amostra em análise. A presença destes grãos não só influencia a capacidade do solo em reter água, mas também a sua continuidade física. Para ambos os aspetos, quanto maior a granulometria, maior será a resistividade. De salientar ainda que, a presença de grãos de vários tamanhos tende a diminuir a resistividade, uma vez que os grãos mais pequenos ocupam os espaços vazios entre os grãos maiores, aumentando assim a continuidade da massa do solo e a capacidade de retenção da humidade.
- **Estrutura geológica** — Anisotropia – Estratificação do solo: Apesar de, muitas vezes desprezado, o solo é na maioria das vezes estratificado em várias camadas sobrepostas de diferentes resistividades. Salienta-se ainda que, devido ao facto de o solo possuir características anisotrópicas, os valores da resistividade medidos variam com a direção. Habitualmente, é considerado o valor médio dessas mesmas medições.

Com maior relevância destacam-se os fatores apresentados na Figura 3.2 [1].

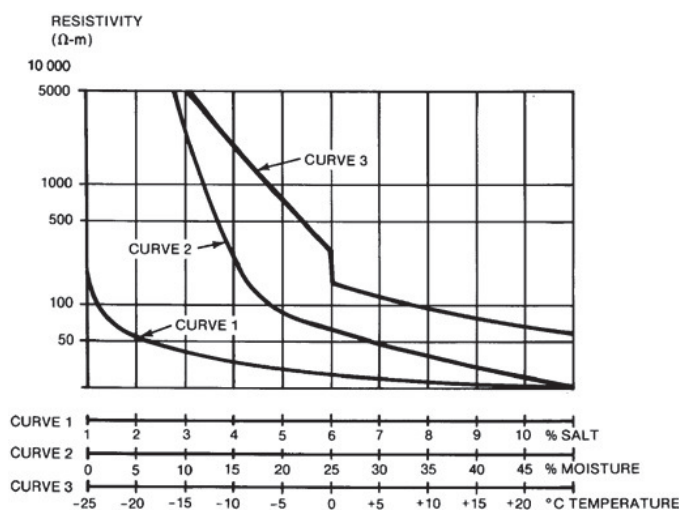


Figura 3.2: Efeito da humidade, temperatura e sais dissolvidos na água na resistividade do solo

Analizando com pormenor a Figura 3.2, verifica-se que até um certo valor de humidade (na ordem dos 22%), a resistividade do solo diminuiu bruscamente com o aumento da mesma, sendo que a partir dessa altura passa a ter um efeito mais atenuado, decrescendo linearmente (curva 2).

A curva 1 da Figura 3.2 ilustra o efeito da concentração de sais (neste caso, cloreto de sódio) na resistividade de um solo com 30% de humidade. É possível concluir, que quando a concentração de sais existente na água é pequena, a resistividade diminui de forma acentuada. A partir de uma concentração na ordem dos 4% essa variação é mais atenuada.

No que diz respeito à temperatura (curva 3), a Figura 3.2 representa uma variação típica para um solo arenoso com uma percentagem de humidade de 15,2%. Verifica-se que com a sua diminuição abaixo dos 0 °C, a resistividade aumenta abruptamente. Isto ocorre uma vez que a humidade presente no solo se torna nula, transformando o mesmo num terreno seco.

3.3 Medição da Resistividade

A medição da resistividade do solo é realizada com o intuito de obter um conjunto de diferentes medidas da qual resultará um modelo equivalente do solo, onde será então montado o sistema elétrico de terra. Estes resultados estarão mais próximos do valor real, quanto maior e mais elaborado for o estudo prévio do terreno, no que diz respeito a informações geológicas, geográficas e também meteorológicas. Este estudo caracteriza-se por ser a primeira etapa do processo de medição da resistividade do solo. Posteriormente, a medição propriamente dita, pode ser realizada de duas formas distintas:

- Medição por amostragem: consiste em retirar uma amostra do solo em estudo e realizar as medições em laboratório;
- Medição local: consiste em injetar uma corrente para a terra entre duas hastes externas e medir a tensão resultante entre as hastes interiores, sendo que estas devem estar todas colocadas segundo o mesmo eixo. Este método é realizado, tal como o nome indica, no próprio local onde irá ser instalado o sistema de terra.

3.3.1 Medição por amostragem

Neste método, a amostra do solo a ser analisado é retirada de uma grande profundidade, uma vez que assim terá sofrido menos alterações devido às variações ambientais verificadas. No entanto, nunca será possível igualar a compactação e a humidade do solo original.

O método consiste em medir a resistência, R , entre duas faces opostas de um cubo de dimensões unitárias, preenchido com a amostra do solo em estudo. O cubo deverá ser de um material isolante.

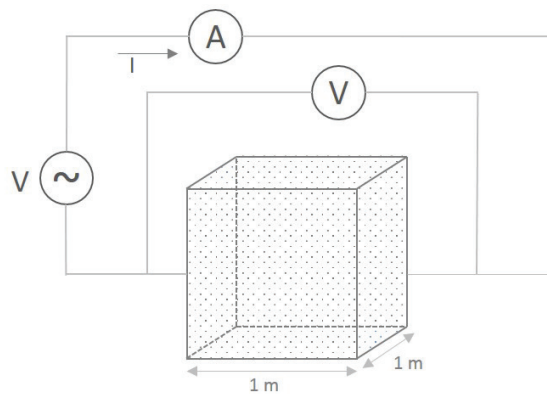


Figura 3.3: Medição da resistividade em laboratório

O esquema da Figura 3.3 representa apenas uma ilustração como pode ser realizado este método. A resistividade pode então ser calculada através das Equações 3.1, 3.2 e 3.3 :

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.1)$$

$$\rho = \frac{R \cdot A}{l} \quad (3.2)$$

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad (3.3)$$

Onde:

ρ - resistividade do solo ($\Omega \text{ m}$);

V - queda de tensão entre as duas faces (V);

I - corrente injetada no cubo (A);

R - resistência obtida pela relação entre V e I (Ω);

l - comprimento da face do cubo (m);

A - área da face do cubo (m^2).

Tal como já foi referido, esta medição tem o inconveniente de não garantir que a amostra analisada tenha as mesmas características que apresentava no local. Assim, é normalmente utilizada apenas como complemento às medições efetuadas no próprio local de estudo, ou ainda para fins específicos de caracterização da resistividade típica para diferentes solos. A possibilidade de realizar várias medições com diferentes amostras também não é uma hipótese fiável, devido às propriedades anisotrópicas e heterogêneas do solo.

3.3.2 Medição local

Atualmente, são frequentemente utilizados métodos através de uma medição local, ou seja, realizada no local onde irá ser implementado o sistema de terras. Assim, pode aferir-se que deles resultam valores mais fidedignos para a resistividade do solo. Os três testes mais comuns são o Método de *Wenner*, o Método de *Schlumberger*, o método *Driven Rod*. De seguida é apresentada uma breve explicação de cada um. É importante referir que em solos homogêneos, a resistividade será constante, contrariamente ao que se verifica em solos heterogêneos, ou ainda em casos em que o espaçamento entre os elétrodos varia. Assim, é notória a necessidade de realizar várias medições, tal como já foi referido anteriormente, com o intuito de obter um valor de resistividade aparente resultante de um método o mais preciso possível. Para além de variar o espaçamento entre elétrodos, é também conveniente alterar a direção dos mesmos dentro da área em questão. Isto deve-se ao facto de o solo possuir, na maioria das vezes, características anisotrópicas e heterogêneas.

Na Figura 3.4 está apresentada uma possível representação das várias medições a efetuar.

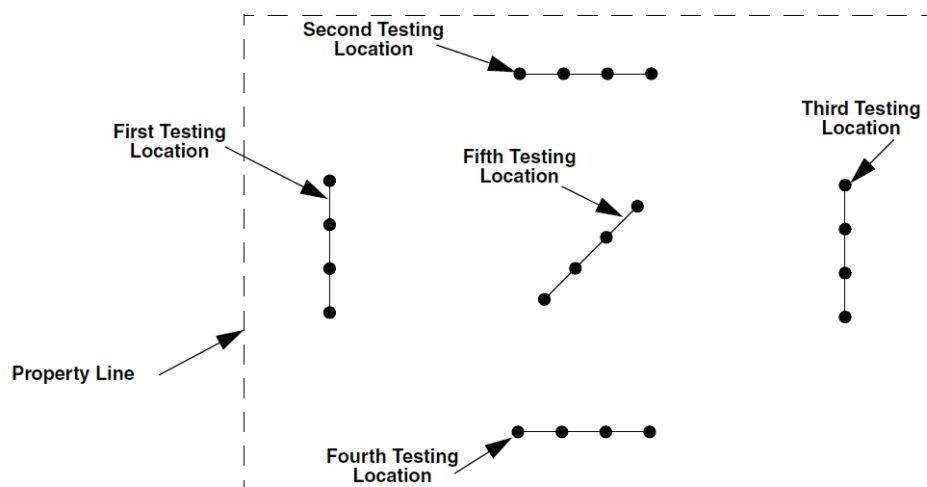


Figura 3.4: Esquema para a realização de várias medições

É ainda importante ressaltar que, quando a distância entre as hastes é pequena, a resistividade do solo medida representa simplesmente um valor indicativo do solo naquele local, sendo por isso necessário realizar mais medições, de forma a obter um valor mais próximo da realidade. Pelo contrário, se as hastes estiveram distanciadas umas das outras, a resistividade medida aproxima-se mais do valor real, uma vez que a medição foi realizada numa área maior. Assim, as medições são normalmente realizadas tendo em consideração que o espaçamento entre as hastes deverá ser da mesma ordem de grandeza, e de preferência superior, relativamente ao tamanho das mesmas.

3.3.2.1 Wenner

O método de *Wenner* consiste em enterrar no solo e à mesma profundidade quatro elétrodos verticais, dispostos em linha e igualmente espaçados, tal como pode ser observado na Figura 3.5 [1, 8–10]. De salientar ainda, que a profundidade a que são enterrados os elétrodos não deve exceder um décimo do espaçamento entre eles [8]. De seguida, é injetada uma corrente nos terminais externos C1 e C2 e é medida a queda de tensão resultante entre os terminais internos P1 e P2. Estabelecendo uma relação entre a tensão e a corrente referidas, obtém-se um valor para a resistência do solo.

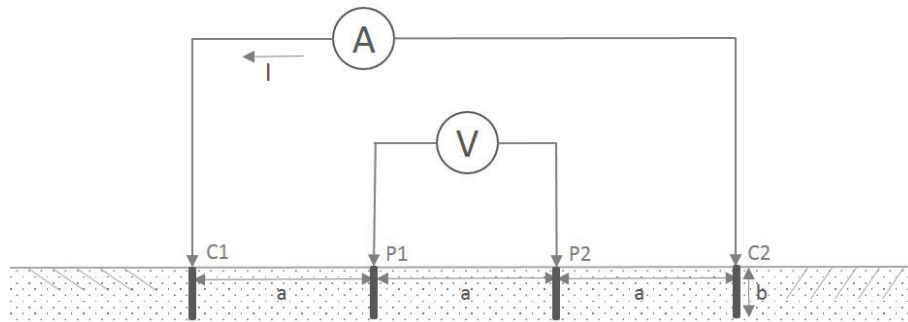


Figura 3.5: Esquema do princípio de medição do método de *Wenner*

A resistência medida é dada pela Equação 3.4:

$$R_{medida} = \frac{V}{I} \quad (3.4)$$

Esta resistência depende fundamentalmente da distância entre os elétrodos e da resistividade do solo, sendo que a dimensão dos elétrodos não tem grande influência.

O valor da resistividade do solo, ρ , pode ser calculado através da Equação 3.5.

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (3.5)$$

Onde:

ρ - resistividade do solo ($\Omega \text{ m}$);

a - espaçamento entre os elétrodos (m);

b - profundidade a que os elétrodos foram enterrados (m);

R - resistência do solo (Ω).

De notar que a Equação 3.5 não é aplicável a todos os elétrodos enterrados a uma qualquer profundidade b , mas apenas a pequenos elétrodos enterrados a uma profundidade b e com fios de ligação isolados. Segundo [4], e analisando a Equação 3.5, pode concluir-se que o valor do

denominador varia entre 1 e 2 dependendo da relação entre a profundidade b e o espaçamento a . Assim é possível obter as seguintes simplificações:

- Quando b é muito grande relativamente a a , então:

$$\rho = 4\pi aR \quad (3.6)$$

- Quando b é muito pequeno relativamente a a , então:

$$\rho = 2\pi aR \quad (3.7)$$

3.3.2.2 Schlumberger

O método de *Schlumberger* é em tudo semelhante ao método apresentado acima, sendo que neste caso os elétrodos exteriores são colocados a uma distância cinco vezes superior à distância entre os elétrodos internos [11].

A medição é efetuada tal como o esquema representado na Figura 3.6.

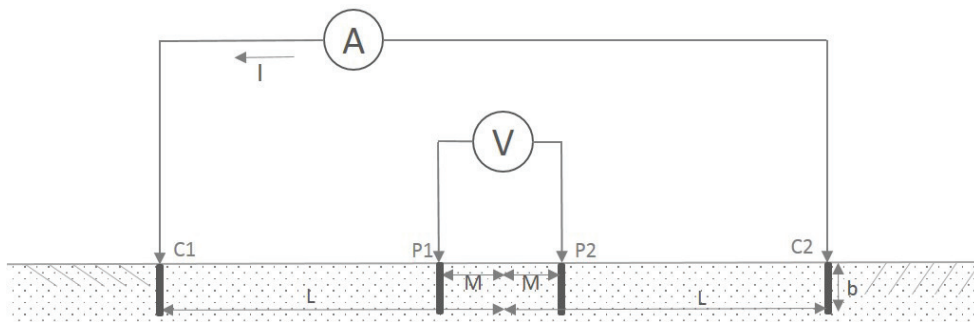


Figura 3.6: Esquema do princípio de medição do método de *Schlumberger*

Segundo [11], este método só pode ser utilizado para um espaçamento mínimo de 10 m e, consequentemente, um espaçamento interno de 0,5 m, sendo que para distâncias menores, o método de *Wenner* é o mais indicado.

Este método proporciona uma diminuição do tempo de medição considerável, quando comparado com o método de *Wenner*, uma vez que para realizar várias medições, de forma a obter um valor mais credível, apenas é necessário mover os dois elétrodos exteriores (de corrente). No caso do método de *Wenner* é necessário mover os quatro elétrodos. Esta é a principal vantagem do método em análise.

A resistividade do solo pode ser calculada através da Equação 3.8.

$$\rho = \frac{\pi L^2 R}{2M} \quad (3.8)$$

Onde:

ρ - resistividade do solo ($\Omega \text{ m}$);

L - metade da distância entre os elétrodos de corrente (m);

M - distância entre os elétrodos de potencial (m);

R - resistência do solo (Ω).

3.3.2.3 Driven Rod

O método *Driven Rod*, consiste em determinar a resistividade do solo a partir da medição da resistência de terra de um eléctrodo vertical, utilizando o método da queda de potencial descrito no Capítulo 4.

Um representação do método pode ser observada na Figura 3.7.

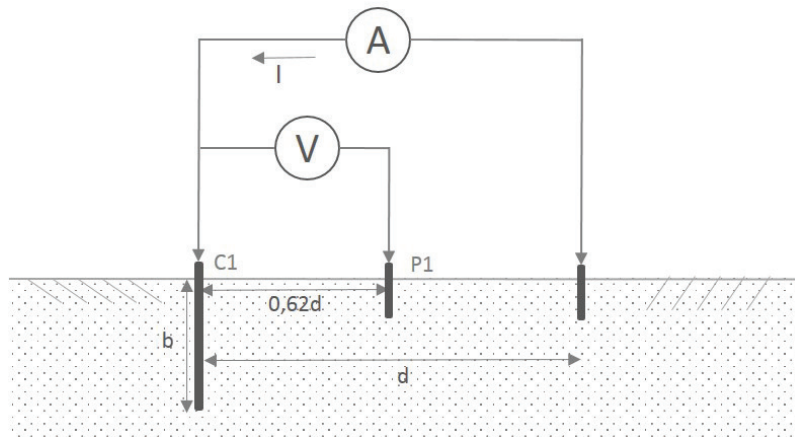


Figura 3.7: Esquema do princípio de medição do método de *Driven Rod*

A resistividade do solo pode então ser calculada através da Equação 3.9.

$$\rho = \frac{2\pi b_2 R}{\ln\left(\frac{2b_2}{d}\right)} \quad (3.9)$$

Onde:

ρ - resistividade do solo ($\Omega \text{ m}$);

R - resistência de terra medida relativa ao eléctrodo vertical (Ω);

b - comprimento do eléctrodo em contacto com o solo (m);

d - espaçamento entre os elétrodos de corrente (m).

Este método é pouco utilizado, uma vez que normalmente o processo é o inverso, ou seja, é calculada a resistência de terra a partir da resistividade do solo. Como vantagem, destaca-se o facto de se poderem efetuar várias medições, sem ser necessário variar o espaçamento entre elétrodos. Pelo contrário, para obter diferentes valores apenas é necessário variar a profundidade a que o elétrodo é enterrado.

3.4 Estrutura do Solo

Devido à não uniformidade do solo, foram realizados diversos estudos com o intuito de obter um modelo, o mais aproximado possível, para o solo em estudo. Assim, nesta secção são apresentadas duas soluções, uma de um solo uniforme e outra para um solo de duas camadas de diferentes resistividades.

3.4.1 Modelo do solo uniforme

Após efetuar as várias medições para a resistividade do solo, se os resultados obtidos forem sempre iguais, conclui-se que a terra existente é uniforme. Na Figura 3.8 está representada uma ilustração de um solo uniforme.

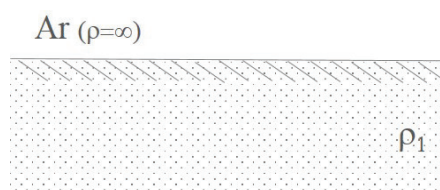


Figura 3.8: Representação de um modelo de solo uniforme

Contudo, dificilmente as diferentes medições resultam exatamente no mesmo valor para a resistividade. Assim, a resistividade aproximada do modelo do solo uniforme pode ser obtida através da média aritmética dos vários valores obtidos, apresentada na Equação 3.10.

$$\rho_a = \frac{\rho_a(1) + \rho_a(2) + \rho_a(3) + \dots + \rho_a(n)}{n} \quad (3.10)$$

Onde,

$\rho_a(1) + \rho_a(2) + \rho_a(3) + \dots + \rho_a(n)$ representam os valores resultantes das várias medições realizadas para diferentes direções e espaçamento entre elétrodos (Ωm);

n representa o número total de medições.

Uma aproximação pode ser realizada através da simplificação apresentada na Equação 3.11.

$$\rho_a = \frac{\rho_a(máx) + \rho_a(min)}{2} \quad (3.11)$$

Onde,

$\rho_a(máx)$ representa o valor máximo medido (Ωm);

$\rho_a(min)$ representa o valor mínimo medido (Ωm).

No entanto, grande parte dos solos não satisfaz as condições necessárias para ser aplicado este modelo, uma vez que, na maioria das vezes, a resistividade varia significativamente de medição para medição. Surge assim a necessidade de estudar um modelo para solos com diferentes camadas.

3.4.2 Solos com duas camadas

Tal como foi referido no ponto anterior, os valores de resistividade variam de medição para medição. Segundo [11], uma variação superior a 30% significa que o solo não é uniforme e assim não é possível aplicar o modelo apresentado no ponto 3.4.1. Surgiu então a necessidade de estudar a situação em que estão presentes dois solos de diferentes resistividades.

O modelo em estudo pode ser representado tal como na Figura 3.9, com uma camada superior de profundidade finita h e resistividade ρ_1 e uma camada inferior de profundidade infinita e resistividade ρ_2 .

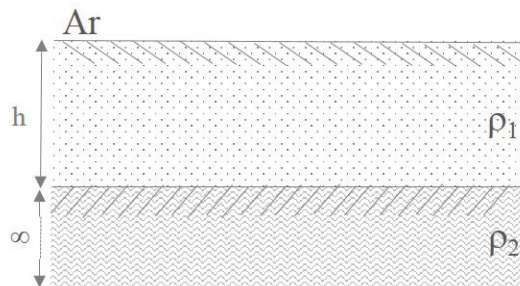


Figura 3.9: Esquema de um solo com duas camadas de diferentes resistividades

Os métodos utilizados para a interpolação do modelo do solo a partir de várias medições podem ser empíricos ou analíticos. Os métodos empíricos são, normalmente, desenvolvidos através da combinação da interpolação com as várias medições efetuadas [11].

3.4.2.1 Método geral

Tal como já foi referido, e relembrando a Figura 3.9, o modelo de solo analisado apresenta duas camadas de diferentes resistividades. Assim, a mudança brusca da resistividade nos limites

de cada camada, pode ser descrita através de um fator de reflexão K definido através da Equação 3.12. [8, 12, 13]

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (3.12)$$

Onde:

ρ_1 representa a resistividade da camada superior (Ωm);

ρ_2 representa a resistividade da camada inferior (Ωm).

Em [8], é apresentada a Equação 3.13, apoiada no método de *Wenner*, para o cálculo da resistividade aparente em função do espaçamento entre os elétrodos.

$$\rho_a = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} \right] \quad (3.13)$$

Onde:

ρ_1 representa a resistividade da camada superior (Ωm);

n representa o número de medições;

K representa o fator de reflexão;

h representa a profundidade da camada superior (m);

a representa o espaçamento entre os elétrodos (m).

3.4.2.2 Método gráfico

O primeiro método gráfico foi desenvolvido por *Sunde* [1] cujos dados são baseados no método de *Wenner*.

Os parâmetros ρ_1 e ρ_2 são obtidos por observação das medições da resistividade aparente, sendo esta uma das principais desvantagens deste método. O terceiro parâmetro h é retirado através do gráfico de *Sunde* representado na Figura 3.10 seguindo os seguintes passos:

- a) Traçar uma curva com os valores da resistividade aparente medidos no eixo dos yy e o espaçamento entre os elétrodos no eixo dos xx ;
- b) Estimar os valores de ρ_1 e ρ_2 a partir do gráfico da resistividade aparente, ρ_a traçado em a). De notar que ρ_a correspondente a espaçamentos pequenos é ρ_1 e ρ_a para espaçamentos maiores é ρ_2

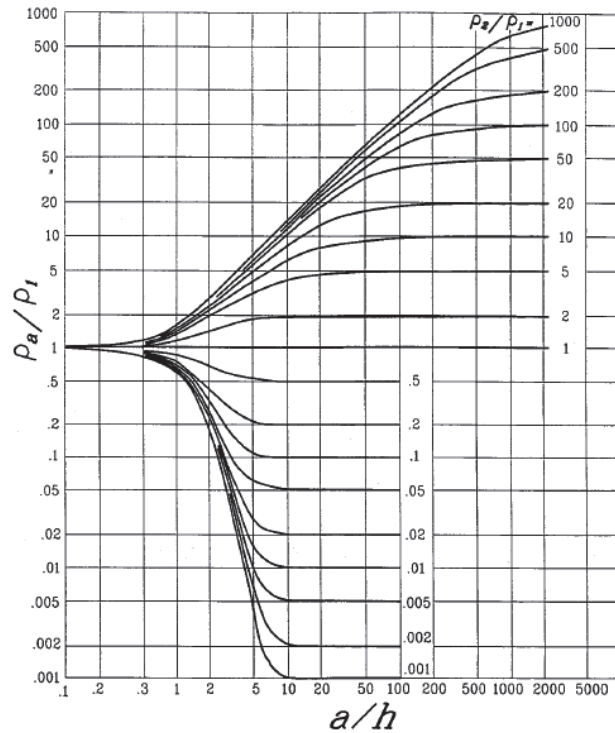


Figura 3.10: Curvas de *Sunde* para um solo com duas camadas

- c) Determinar $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ e seleccionar a curva que mais se aproxima no gráfico de *Sunde*. Alternativamente, interpolar e desenhar uma nova curva;
- d) Seleccionar no eixo dos yy, o valor de $\frac{\rho_a}{\rho_1}$ na região inclinada da curva $\frac{\rho_2}{\rho_1}$;
- e) Ler o valor correspondente de $\frac{a}{h}$ no eixo dos xx;
- f) Calcular ρ_a multiplicando $\frac{\rho_a}{\rho_1}$, seleccionado no ponto d), por ρ_1 .
- g) Ler o valor do espaçamento, a , correspondente, a partir do gráfico da resistividade aparente traçado em a).
- h) Calcular a profundidade da primeira camada, h , correspondente ao espaçamento referido.

Para uma melhor compreensão, é possível observar um exemplo da aplicação deste método em [1].

Como é possível concluir, as curvas de *Sunde* permitem uma aproximação grosseira dos parâmetros do solo, uma vez que alguns dos parâmetros são estimados, recorrendo meramente a uma análise visual. Por este mesmo motivo, surgiu a necessidade de estudar outros métodos mais precisos, recorrendo a métodos computacionais ou ainda a formulações matemáticas mais complexas.

Em [14], *Dawalibi e Blattner* estudaram uma solução mais precisa e rigorosa. Estes desenvolveram uma duplicação das curvas de *Sunde* e providenciaram um programa computacional capaz de determinar os parâmetros do solo a partir de uma aproximação por correspondência a curvas logarítmicas. A principal desvantagem deste método é o facto de não ser uma solução analítica e de se apoiar nas curvas de *Sunde*.

Mais tarde, em [15], *Seedher e Arora*, conseguiram minimizar os erros dos métodos falados anteriormente, introduzindo nas equações de [1], constantes de amortecimento. Mais uma vez, e apesar de o método apresentar resultados mais precisos, este detém a mesma desvantagem do anterior, na medida em que utiliza novamente as curvas de *Sunde* como ponto de partida.

Em [16], *Del Alamo* efetua uma comparação entre as várias técnicas utilizadas e introduz um novo método de otimização de *Newton* com o intuito de melhorar os valores obtidos para os parâmetros do solo. Com este método, os erros foram novamente minimizados, sendo que, no entanto, são utilizadas as equações que originaram as curvas de *Sunde*, representando mais uma vez uma desvantagem do mesmo. Destaca-se ainda o facto de este método ser limitado, já que possui condições iniciais características do processo de otimização.

Ainda no âmbito desta investigação, *Gonos e Stathopulos*, em [19], recorreram a um algoritmo genético para reduzir os erros dos parâmetros do solo em estudo. Esta técnica foi utilizada com sucesso, melhorando o processo de otimização, mas não eliminou o uso das curvas de *Sunde*.

Como foi possível verificar pela descrição cronológica acima apresentada, todos os métodos estudados utilizam as curvas de *Sunde* como ponto de partida. É de salientar que estas curvas foram geradas a partir de séries infinitas, bastante complexas e cujo comportamento não é, de todo, previsível. Contudo, foi possível constatar que alterando o processo de otimização, os erros dos parâmetros para realização do modelo do solo são minimizados, resultando assim numa melhoria significativa dos projetos de sistemas de terra.

Mais recentemente, em [17], *Gary* realizou um aprofundado estudo das curvas de *Sunde* com o objetivo de tornar as equações das quais estas resultam, mais simples do ponto de vista matemático. Esta preocupação por parte do autor, não é apenas com o propósito de tornar o estudo menos complexo, tem também como meta, numa fase posterior, a possibilidade de estender o estudo a solos com mais do que duas camadas. As curvas de *Sunde* surgiram da aplicação do método das imagens que considera as várias reflexões resultantes da existência de dois solos. O método proposto por *Gary* supera a dificuldade causada por essas mesmas reflexões, simplificando cada curva, e tratando-a como um conjunto de duas assíntotas. Este olha para as assíntotas, por inspeção geométrica e por expansão analítica das assíntotas, a partir das soluções associadas à equação de *Laplace*. As equações resultantes são bastantes rigorosas e simples do ponto de vista matemático. Em [17], são apresentados valores relativos a um estudo do autor, nos quais é possível constatar a precisão do seu método. Assim, *Gary* afirma que, recorrendo a métodos computacionais, a obtenção de um modelo do solo em estudo é agora um processo mais rápido e acessível.

3.5 Conclusão

A resistência de terra é diretamente proporcional à resistividade do solo onde vão ser colocados os elétrodos e implementado o sistema de terra. Assim, não faria sentido estudar a resistência de terra sem antes perceber o conceito e o que afeta a resistividade do solo.

Uma das razões pela qual é importante perceber os fatores que a influenciam é a possibilidade de assim encontrar novas formas de a melhorar. Os principais fatores, e que foram explicados neste capítulo, são a humidade, a concentração de sais e a temperatura.

Neste capítulo são ainda apresentados os vários métodos de medir a resistividade do solo, sendo que, na maioria dos casos, e por apresentar resultados mais próximos da realidade, é utilizado o método de medição no próprio local onde vão ser enterrados os elétrodos. Mesmo dentro deste tipo de medição existem diferentes abordagens dependendo dos autores, mas mais uma vez, existe um que é mais comum utilizar. Trata-se do método de *Wenner*.

Para finalizar o capítulo, foi estudada a estrutura do solo. Este foi o ponto fulcral para perceber como tratar um solo de duas camadas com diferentes resistividades, um vez que este era um dos principais objetivos desta dissertação.

É sabido que os solos apresentam uma irregularidade imprevisível, contando com infinitas camadas, quer verticais ou horizontais, e até mesmo aleatórias. No entanto, para o estudo que foi realizado, considerou-se que o solo seria apenas composto por duas camadas, em que a segunda apresentaria uma profundidade infinita.

Em casos práticos, a resistividade que é medida trata-se de uma resistividade aparente, que conta já com os efeitos das duas camadas consideradas. A partir do valor medido, e com o apoio dos métodos apresentados no último ponto deste capítulo, é possível obter um modelo de como será a estrutura do solo, nomeadamente dos valores das resistividades de cada camada e da altura da primeira.

Por fim, foi apresentada uma vasta pesquisa bibliográfica dos métodos que surgiram de forma a melhorar a obtenção de um modelo do solo o mais preciso possível. Desta pesquisa puderam salientar-se 3 métodos: o método do gráfico de *Sunde*, do qual partiu toda a pesquisa neste âmbito da obtenção dos parâmetros característicos do solo, o método de *Gonos* e *Stathopoulos* que pensaram num algoritmo genético, de modo a tornar os valores dos parâmetros do solo mais precisos e, por fim, o método de *Gary*, simplifica as curvas de *Sunde* tratando-as como um conjunto de assíntotas. A cada um deles estão associadas particularidades, vantagens e desvantagens que este capítulo permitiu sublinhar.

Capítulo 4

Resistência de Terra

Uma ligação à terra é, habitualmente, tratada como sendo apenas uma resistência de terra. No entanto, fisicamente apresenta também valores de capacitância e indutância, os quais influenciam a capacidade de escoamento da corrente para o solo.

Para situações de baixa frequência, baixas correntes e valores de resistividade do solo pouco elevados, estes parâmetros são desprezados e supõe-se que o solo se comporta praticamente como uma resistência linear.

Designa-se por resistência de terra R_T , a resistência oferecida pelo eléctrodo à passagem de corrente eléctrica para o solo, e é dada, de uma forma geral, pela razão entre a tensão no eléctrodo V_T e a corrente I injetada no solo através do mesmo (4.1).

$$R_T = \frac{V_T}{I} \quad (4.1)$$

Esta resistência oferecida pelo eléctrodo à passagem da corrente divide-se em três componentes principais [4]:

- Resistência própria do eléctrodo e das ligações eléctricas ao mesmo- de pequeno valor dada a condutividade dos metais utilizados;
- Resistência de contacto entre o eléctrodo e a terra adjacente ao mesmo- desprezável se o contacto do eléctrodo com o solo for bom, e se o eléctrodo não estiver coberto com um material isolante;
- Resistência de terra da vizinhança do eléctrodo- esta é a componente fundamental do valor da resistência de terra e depende essencialmente da resistividade do solo e da distribuição da corrente no mesmo, directamente relacionada com a forma e as dimensões do eléctrodo.

4.1 Limites para o valor da Resistência de Terra

Tal como já foi referido, para uma instalação ser considerada segura, é necessário que a resistência de terra não ultrapasse determinados valores. Esta deverá ser tão baixa quanto possível, considerando-se uma situação ideal aquela em que o seu valor é de 0Ω .

A EDP, em [18], estabelece os valores máximos admissíveis de acordo com o explícito na Tabela 4.1 para os diferentes tipos de instalação.

Tabela 4.1: Valores máximos para a resistência de terra

Instalação	Resistência de terra máxima (Ω)
Redes BT e IP	10 ou 20
Redes MT	20
Postos de Transformação	20

É importante referir que, caso a terra de serviço e de proteção sejam apenas uma, a chamada terra única, esta deverá ter um valor igual ou inferior a 1Ω .

4.2 Determinação da Resistência de Terra

A determinação da resistência de terra requer a realização de desenvolvimentos analíticos de complexidade variável, dependendo da forma e dimensão do eléctrodo. Como resposta a esta necessidade, os estudos primordiais de *Dwight* permitiram chegar a diferentes equações capazes de determinar esta resistência para um conjunto variado de configurações de eléctrodos [19].

Tabela 4.2: Fórmulas para calcular a resistência de terra (Adaptado de [19])

Tipo de Eléttrodo	Equação
Eléttrodo vertical (Comprimento ℓ e raio a)	$R = \frac{\rho}{2\pi\ell} \left(\ln \frac{4\ell}{a} - 1 \right)$
Eléttrodos verticais em paralelo ($s > L$)	$R = \frac{\rho}{4\pi\ell} \left(\ln \frac{4\ell}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{\ell^2}{3s^2} + \frac{2}{5} \frac{\ell^4}{s^4} \dots \right)$
Eléttrodos verticais em paralelo ($s < L$)	$R = \frac{\rho}{4\pi\ell} \left(\ln \frac{4\ell}{a} + \ln \frac{4\ell}{s} - 2 + \frac{s}{2\ell} - \frac{s^2}{16\ell^2} + \frac{s^4}{512\ell^4} \dots \right)$
Eléttrodo Horizontal (Tamanho 2ℓ e profundidade $s/2$)	$R = \frac{\rho}{4\pi\ell} \left(\ln \frac{4\ell}{a} + \ln \frac{4\ell}{s} - 2 + \frac{s}{2\ell} - \frac{s^2}{16\ell^2} + \frac{s^4}{512\ell^4} \dots \right)$
Braços a 90° (Tamanho do braço ℓ e profundidade $s/2$)	$R = \frac{\rho}{4\pi\ell} \left[\ln \left(\frac{2\ell}{a} \right) + \ln \left(\frac{2\ell}{s} \right) - 0,237 + 0,215 \frac{s}{\ell} + 0,104 \frac{s^2}{\ell^2} - 0,042 \frac{s^4}{\ell^4} \dots \right]$
Estrela 3 pontos (Tamanho do braço ℓ e profundidade $s/2$)	$R = \frac{\rho}{6\pi\ell} \left[\ln \left(\frac{2\ell}{a} \right) + \ln \left(\frac{2\ell}{s} \right) + 1,071 - 0,209 \frac{s}{\ell} + 0,238 \frac{s^2}{\ell^2} - 0,054 \frac{s^4}{\ell^4} \dots \right]$
Estrela 4 pontos (Tamanho do braço ℓ e profundidade $s/2$)	$R = \frac{\rho}{8\pi\ell} \left[\ln \left(\frac{2\ell}{a} \right) + \ln \left(\frac{2\ell}{s} \right) + 2,912 - 1,071 \frac{s}{\ell} + 0,645 \frac{s^2}{\ell^2} - 0,145 \frac{s^4}{\ell^4} \dots \right]$
Estrela 6 pontos (Tamanho do braço ℓ e profundidade $s/2$)	$R = \frac{\rho}{12\pi\ell} \left[\ln \left(\frac{2\ell}{a} \right) + \ln \left(\frac{2\ell}{s} \right) + 6,851 - 3,128 \frac{s}{\ell} + 1,758 \frac{s^2}{\ell^2} - 0,490 \frac{s^4}{\ell^4} \dots \right]$
Estrela 8 pontos (Tamanho do braço ℓ e profundidade $s/2$)	$R = \frac{\rho}{16\pi\ell} \left[\ln \left(\frac{2\ell}{a} \right) + \ln \left(\frac{2\ell}{s} \right) + 10,98 - 5,51 \frac{s}{\ell} + 3,26 \frac{s^2}{\ell^2} - 1,17 \frac{s^4}{\ell^4} \dots \right]$
Anel (Diâmetro do anel D , diâmetro do condutor d e profundidade $s/2$)	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left[\ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{4D}{s} \right]$
Placa horizontal (Comprimento 2ℓ secção axb ($b < a/8$) e profundidade $s/2$)	$R = \frac{\rho}{4\pi\ell} \left[\ln \frac{4\ell}{a} + \frac{a^2 - \pi ab}{2(a+b)^2} + \ln \frac{4\ell}{s} - 1 + \frac{s}{2\ell} - \frac{s^2}{16\ell^2} + \frac{s^4}{512\ell^4} \dots \right]$
Chapa circular horizontal (Raio a e profundidade $s/2$)	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left[1 - \frac{7a^2}{12s^2} + \frac{33a^4}{40s^4} \right]$
Chapa circular vertical (Raio a e profundidade $s/2$)	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left[1 + \frac{7a^2}{12s^2} + \frac{99a^4}{320s^4} \right]$

Uma melhor explicação da obtenção e consequente aplicação das equações presentes na Tabela 4.2 pode ser lida em [19].

4.3 Métodos de Medição da Resistência de Terra

A resistência de terra é dada pela razão entre a tensão do sistema de terra, relativamente a um ponto infinitamente afastado, e a corrente que flui entre o sistema e esse mesmo ponto. Assim, teoricamente, a resistência de terra pode ser obtida desta forma, tirando partido apenas de voltmímetro e amperímetros aquando desta medição. No entanto, e com a natural evolução tecnológica surgiram aparelhos que permitem o cálculo direto do valor desta resistência.

4.3.1 Método da queda de potencial (três terminais)

Para aplicar o método da queda de potencial é necessário proceder à implementação prática do circuito representado na Figura 4.1.

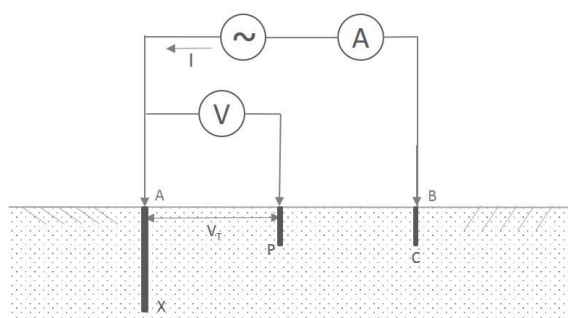


Figura 4.1: Circuito implementado para a medição pelo método em análise

O objetivo deste método passa por medir a resistência de terra no eletrodo X e para isso é aplicada uma corrente alternada entre esse mesmo eletrodo, e o eletrodo C, colocado a uma distância suficientemente grande. A necessidade desta distância surge para evitar possíveis interferências entre eletrodos, resultantes da sua proximidade 4.2.

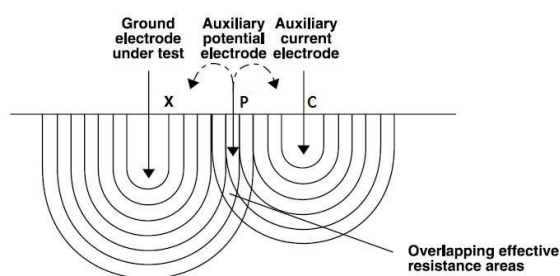


Figura 4.2: Sobreposição entre as áreas de interferência os dois eletrodos [20]

Finalmente, e concluindo o método, é medida a tensão no solo recorrendo, neste caso, a um multímetro e ao elétrodo P [3].

É importante referir que, aquando da medição da resistência de terra, o sistema que está a ser medido deverá estar aberto para assim, garantir a segurança do operador.

Variando a posição do elétrodo P, são efetuadas diversas medições e assim adquiridos diferentes valores que permitem traçar o perfil de tensão entre os eléttrodo X e C, desenhando-se uma curva semelhante à que está ilustrada na Figura 4.3.

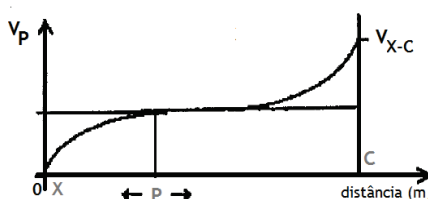


Figura 4.3: Variação da tensão com a distância do elétrodo P [3]

A partir desta curva é possível desenhar uma semelhante, mas com valores de resistência de terra no eixo dos yy, sendo que para isso basta dividir os valores lidos no voltímetro, pela corrente que flui no solo.

Numa situação prática existe a chamada *Regra dos 62%*. Esta regra afirma que, ao colocar o elétrodo P, a 62% da distância entre X e C, iniciando a contagem a partir de X, se pode afirmar que o elétrodo P se encontra na zona do patamar de potencial. Uma forma de o comprovar é efetuar mais duas medições variando o espaçamento em 10 % relativamente ao primeiro e verificar se os valores obtidos não diferem em mais de 2%. Caso se verifique, a resistência de terra toma o valor médio das três medições [3]. No entanto, este método apenas pode ser aplicado quando os três eléttrodo são eléttrodo simples e devem ser colocados na mesma linha, como já foi referido. Para uma maior fiabilidade dos resultados obtidos, é aconselhável que as medições sejam efetuadas em direções diferentes.

4.3.2 Método Seletivo

O método seletivo surge como uma variação do método da queda de potencial, fornecendo as mesmas medições, mas de uma forma mais simples, uma vez que não é necessário desconectar o elétrodo no qual se está a efetuar a medição [21]. A implementação é semelhante e consiste em enterrar dois eléttrodo de teste, suficientemente afastados do elétrodo no qual se quer medir a resistência tal como na Figura 4.4. Neste método é medida a corrente diretamente no elétrodo recorrendo a uma pinça amperimétrica.

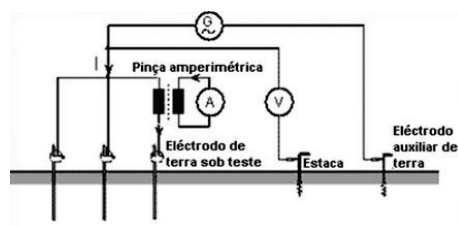


Figura 4.4: Circuito implementado para a medição pelo método em análise [21]

4.3.3 Método direto (dois terminais)

É comum utilizar este método quando, perto do eletrodo onde se quer medir a resistência de terra, existe um sistema que possa funcionar como terra de referência. As redes hidráulicas de tubos metálicos são possíveis sistemas deste tipo. É importante referir que este sistema deverá apresentar um valor de resistência muito pequeno e deverá encontrar-se a uma distância suficientemente grande, de modo a evitar possíveis resistências mútuas. Pode dizer-se que a distância não deverá ser inferior a dez vezes o tamanho do eletrodo onde se pretende medir a resistência. [3]

Uma possível representação de como efetuar esta medição está esquematizado na Figura 4.5.

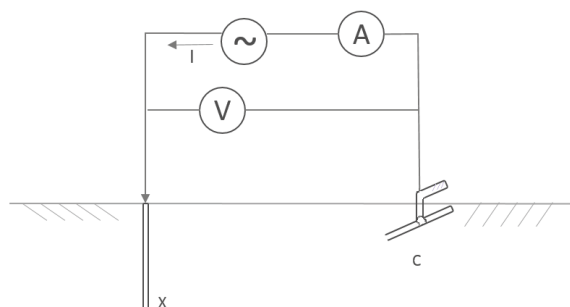


Figura 4.5: Circuito implementado para a medição pelo método em análise

A principal vantagem deste método centra-se na sua simplicidade de aplicação. No entanto acarreta uma enorme desvantagem no que diz respeito à fiabilidade dos resultados obtidos.

4.3.4 Método do triângulo (método de Kolrausch)

Este método consiste em enterrar no solo dois eletrodos, A e B, de forma a que estes, juntamente com o eletrodo no qual se quer medir a resistência de terra, formem um triângulo equilátero. Mais uma vez, os eletrodos devem estar suficientemente espaçados de modo a não haver interferências entre eles [3]. Uma possível representação deste método, é apresentada na Figura 4.6.

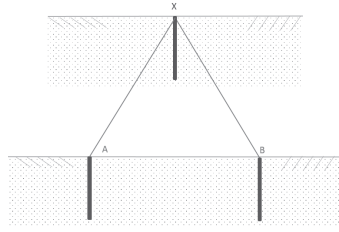


Figura 4.6: Circuito implementado para a medição pelo método em análise

Neste método são efetuadas três medições, uma para cada par de eletrodos, sendo que a resistência em cada medida corresponde à soma das resistências de cada eletrodo considerado.

As três leituras L_1 , L_2 e L_3 são então dadas por: $L_1 = R_X + R_A$; $L_2 = R_X + R_B$ e $L_3 = R_A + R_B$.

Assim, a resistência de terra no ponto do eletrodo X é dada por:

$$R_X = \frac{L_1 + L_2 - L_3}{2} \quad (4.2)$$

A dificuldade de implementação deste método faz com que se desvirtue a sua utilização frequente, suportada também pela sua falta de exatidão, resultante da propagação dos erros durante os cálculos intermédios.

4.4 Métodos para o cálculo da Resistência de Terra

Uma vez apresentados os métodos atualmente existentes para a medição da resistência de terra, e face à elevada pertinência da possibilidade de a calcular à priori de qualquer instalação, são de seguida apresentados alguns métodos considerados mais relevantes para o cálculo da resistência de terra.

4.4.1 Schwarz

Tal como já foi referido, *Dwight* foi o primeiro a estudar métodos de calcular a resistência de terra para diferentes tipos e configurações de eletrodos. Para o tipo de eletrodo mais comum, o eletrodo vertical, de comprimento ℓ e raio a , enterrado num solo homogêneo de resistividade ρ_1 , a resistência de terra pode ser calculada através da Equação 4.3.

$$R = \frac{\rho}{2\pi\ell} \left(\ln \frac{4\ell}{a} - 1 \right) \quad (4.3)$$

No entanto, muito dificilmente são obtidos os resultados pretendidos para a resistência de terra de uma instalação, com apenas um eletrodo. Surgiu então a necessidade de estudar novas formas de calcular a resistência de terra, considerando agora a utilização de N eletrodos.

Segundo a pesquisa bibliográfica efetuada, *Schwarz* foi o primeiro a deduzir uma equação para o cálculo de resistências de terra de um sistema composto com N elétrodos, igualmente espaçados, numa determinada área. A resistência de terra pode ser calculada através da Equação 4.4.

$$R = \frac{\rho}{2\pi N\ell} \left[\ln \left(\frac{4\ell}{a} \right) - 1 + \frac{2k_1\ell}{\sqrt{A}} (\sqrt{N} - 1)^2 \right] \quad (4.4)$$

Onde:

ρ representa a resistividade do solo (Ωm);

ℓ o tamanho dos elétrodos (m);

a raio dos elétrodos (m);

N número de elétrodos;

k_1 coeficiente.

As curvas características de k_1 variam em função da razão entre o comprimento e a largura da área em que os elétrodos estão instalados. As curvas representadas na Figura 4.7 são características de áreas equivalentes a placas finas quadradas ou retangulares, para diferentes profundidades de enterramento [22].

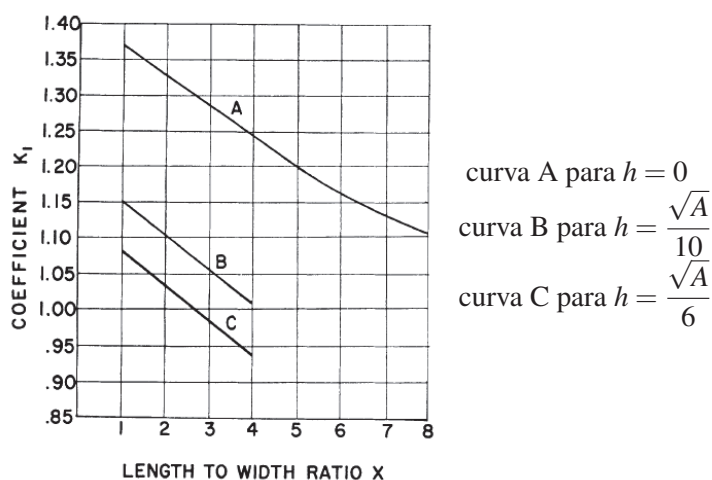


Figura 4.7: Curvas características do fator k_1 [22]

4.4.2 Nahman

O estudo de métodos capazes de calcular a resistência de terra quando aplicados dois ou mais elétrodos, poderia ter-se ficado pelo método proposto por *Schwarz* não fosse a sua particularidade de apenas considerar solos homogêneos.

Assim, e uma vez que a realidade é na maioria das vezes contrária, o estudo continuou no sentido de criar um método capaz de considerar a natural heterogeneidade do solo.

Desta forma, *Nahman et al*, tirando partido do já definido por *Schwarz*, introduziram algumas modificações capazes de considerar um solo composto por duas camadas de resistividades distintas.

Começaram por estudar o caso em que os eléttodos estão apenas inseridos na primeira camada e numa fase posterior, quando estes atravessam ambas as camadas consideradas.

• Eléttodos na primeira camada

Para a situação em que os eléttodos atravessam apenas a primeira camada, tal como ilustrado na Figura 4.8, foi introduzido na equação de Schwarz (4.4) um fator de correção relativo à não uniformidade do solo (k_p).

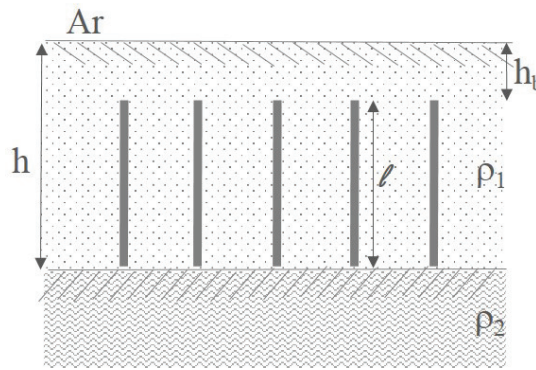


Figura 4.8: Eléttodos enterrados apenas na primeira camada

A resistência de terra é então dada por:

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi N\ell} \left[\ln \left(\frac{4\ell}{a} \right) - 1 + \frac{2\ell}{\sqrt{A}k_1k_p} (\sqrt{N} - 1)^2 \right] \quad (4.5)$$

O fator de correção para um solo não homogéneo (k_p) varia em função do coeficiente de reflexão K e de um fator p relacionado com a profundidade, tanto da primeira camada do solo como de enterramento dos eléttodos, e a área ocupada por eles. Este fator pode ser obtido através da análise da Figura 4.9.

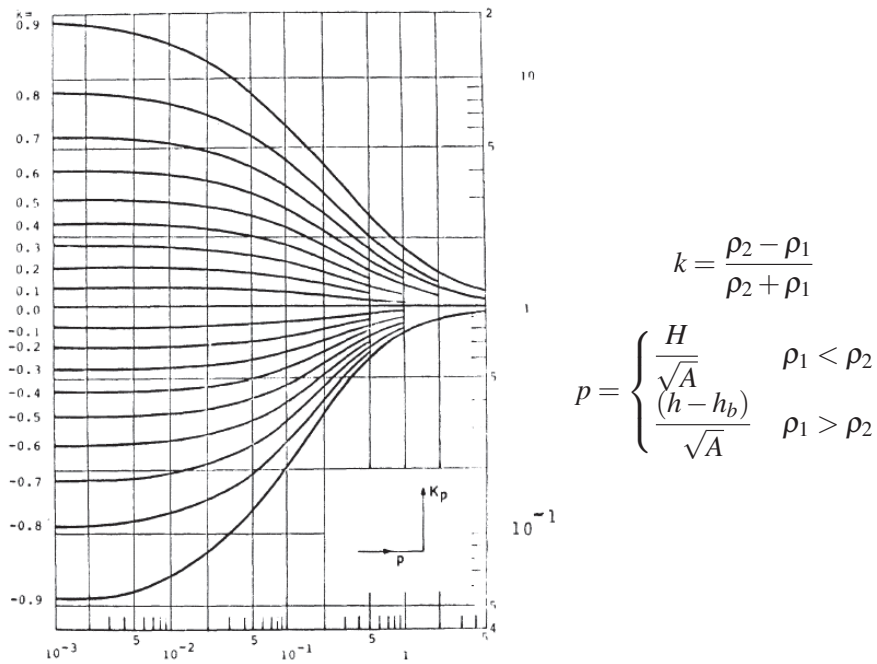


Figura 4.9: Curvas características do fator k_p

• Eléttodos nas duas camadas

Para a situação em que os eléctrodos estão enterrados até à segunda camada do solo, tal como representado na Figura 4.10, é então necessária a inclusão de um fator de não uniformidade para a parte do eléctrodo que se encontra na segunda camada (k'_p).

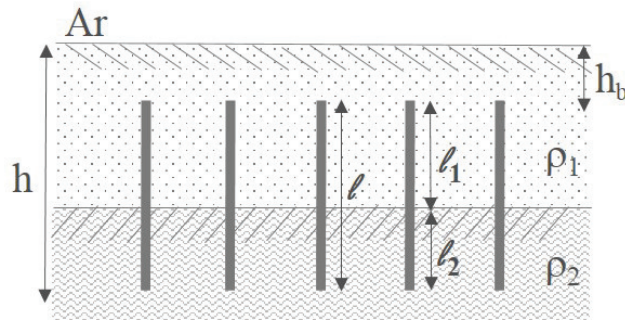


Figura 4.10: Eléttodos enterrados a perfurar as duas camadas

A resistência de terra pode ser obtida através da Equação 4.6

$$R = \frac{\rho_a}{2\pi N \ell} \left[\ln \left(\frac{4\ell}{a} \right) - 1 \right] + \frac{\rho_2}{\sqrt{AN}\pi} k_1(0) k'_p (\sqrt{N} - 1)^2 \quad (4.6)$$

Em que:

$$\ell_a = \ell_2 + \ell_1 \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (4.7)$$

$$\rho_a = \rho_2 \frac{\ell}{\ell_1} \quad (4.8)$$

$$\ell = \ell_1 + \ell_2 \quad (4.9)$$

Este fator de correção k'_p , relativo à segunda camada do solo, é semelhante ao fator k_p apresentado anteriormente. Uma vez mais, este fator varia em função do coeficiente K , que relaciona diretamente a resistividade de ambas as camadas, e do fator p que, neste caso, depende apenas da profundidade da primeira camada e da área ocupada pelos elétrodos. Este fator pode ser obtido através da análise da Figura 4.11.

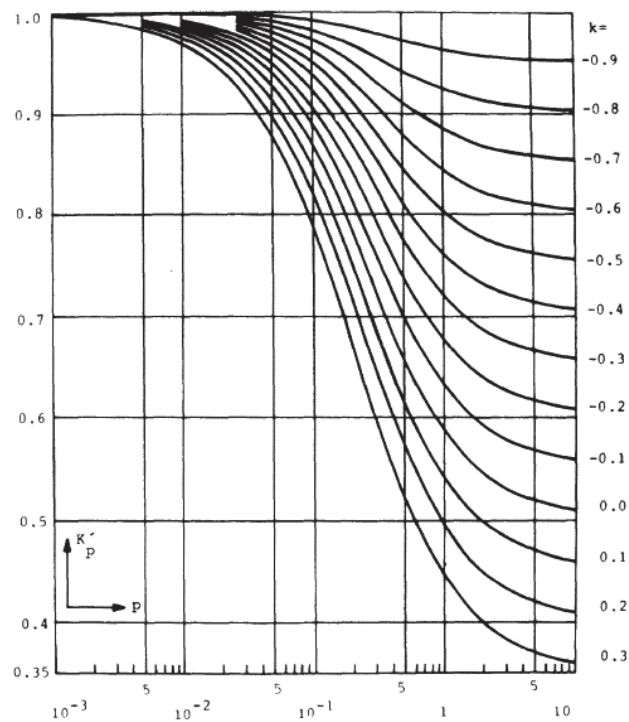


Figura 4.11: Curvas características do fator k'_p

4.4.2.1 Novo estudo de Nahman

Sempre com o intuito de melhorar os métodos existentes, *Nahman e Djordjevic* estudaram, em [23], um conjunto de 140 amostras de elétrodos enterrados num solo uniforme, variando a área

e a profundidade a que estes foram enterrados. Este estudo permitiu-lhes concluir que a resistência de terra poderia ser calculada através da Equação 4.10.

$$R_u = 0,13 \times \frac{\rho}{\sqrt{A}} \times \left(1 - \frac{2}{3} \frac{\ell}{\sqrt{A}}\right) \times \log_{10} \left(\frac{2400\sqrt{A}}{N}\right) \quad (4.10)$$

Onde:

R_u - resistência de terra num solo uniforme (Ω);

as restantes variáveis correspondem ao mesmo especificado pelo método anterior.

No caso da existência de um solo não uniforme, mais precisamente, um solo com duas camadas de diferentes resistividades, é introduzido um fator de correção C_r e a resistência de terra pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$R = R_u \times C_r \quad (4.11)$$

Onde:

R - resistência de terra num solo de duas camadas (Ω);

R_u - resistência de terra num solo uniforme (Ω);

C_r - fator de correção.

Este fator de correção foi testado para 2200 casos com os elétrodos dispostos em diferentes configurações, variando também a área, a profundidade a que são enterrados e a relação entre $\frac{\rho_1}{\rho_2}$.

Os valores de C_r podem ser calculados através da seguinte expressão empírica:

$$C_r = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^x \quad (4.12)$$

Onde:

$$x = \begin{cases} 0,59 \times \log_{10}\left(\frac{15,5}{H}\right) + 0,016 \log_{10}(4,2H)(\log_{10}(N\sqrt{A}))^2 & \frac{\rho_2}{\rho_1} < 1 \\ 0,57 \times \log_{10}\left(\frac{8,5}{H}\right) + 0,06 \log_{10}(10H) \log_{10}(NA) & \frac{\rho_2}{\rho_1} > 1 \end{cases} \quad (4.13)$$

No entanto, após uma análise cuidada da Equação 4.10, concluiu-se que esta só poderá ser aplicada para casos em que a área, na qual os elétrodos são colocados, é muito grande, ou ainda em casos em que os elétrodos são muito pequenos, uma vez que se tem:

$$\left(1 - \frac{2}{3} \frac{\ell}{\sqrt{A}}\right) < 0 \quad (4.14)$$

Sempre que

$$\frac{\ell}{\sqrt{A}} > \frac{3}{2} \quad (4.15)$$

resultando assim numa resistência de terra negativa, o que é, fisicamente, impossível.

4.4.3 Chow et al.

Os estudos continuaram uma vez que, os métodos acima expostos, apresentam duas grandes desvantagens:

- O erro no cálculo da resistência terá tendência a ser elevado, para valores de K muito grandes. Isto deve-se, muito provavelmente, ao facto de não serem consideradas as imagens a partir da camada inferior.
- A limitação da aplicabilidade dos métodos, uma vez que estes dependem de constantes empíricas, extraídas a partir das curvas de gráficos, para um número limitado de casos.

Estudos de Chow, para um solo com duas camadas e, considerando que os eléctrodos são inseridos até à camada mais baixa, concluíram que a resistência de terra pode ser obtida através do paralelo das duas resistências para cada solo, tal como na Equação 4.16:

$$R_t = \frac{1}{\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b}} \quad (4.16)$$

Uma possível ilustração da colocação dos eléctrodos pode ser observada na Figura 4.12.

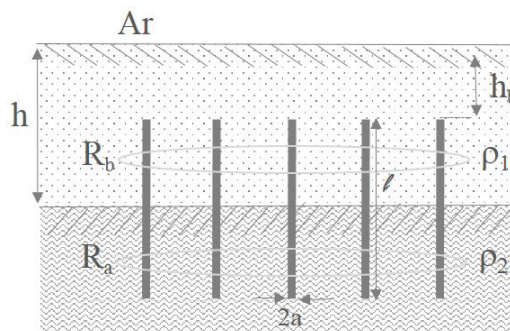


Figura 4.12: Ilustração dos eléctrodos enterrados nas duas camadas

A resistência da camada inferior é dada por:

$$R_a = \frac{\rho_2}{(\ell + h_b - h)} \cdot g_0 \frac{F_0}{N} \quad (4.17)$$

E a resistência da camada superior por:

$$R_b = \frac{\rho_1}{(h - h_b)} \cdot g_0 \frac{F_0}{N} + \frac{\rho_1}{h} \cdot \phi_0 \quad (4.18)$$

As restantes variáveis podem ser obtidas através das equações 4.19 a 4.23:

$$g_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2\ell}{a} \right) - 1 + \frac{\ln 2}{1 + \frac{(4\ln 2)h_b}{\ell}} \right] \quad (4.19)$$

$$F = 1 + \left(N - \frac{1}{\sqrt{N}} \right) \frac{R_s}{R_\ell} \quad (4.20)$$

Onde

$$\frac{R_s}{R_\ell} = \frac{\sqrt{\frac{\ell}{r} \left[\left(\frac{1}{2} \right)^3 + \left(\frac{\ell}{\ell + \frac{r}{2}} \right)^3 \right] \frac{1}{3}}}{2\pi g_0} \quad (4.21)$$

As múltiplas reflexões que ocorrem num solo de duas camadas alteram o comprimento dos elétrodos, sendo que:

$$F_0 = F \Big|_{\ell \rightarrow \frac{\ell}{1 - 0,9k}} \quad (4.22)$$

$$\phi = \frac{\frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{1}{1 - k} \right)}{\sqrt{\left(\frac{N}{F_0} - 1 \right)^2 \left(\frac{\ell + h_b}{h} \right)^2 + 1}} \quad (4.23)$$

A principal vantagem deste método reside no facto de não depender de gráficos ou tabelas com valores empíricos. Pelo contrário, este método resulta da utilização de métodos analíticos bastante completos e complexos. Destaca-se ainda a vantagem de ser bastante preciso e de fácil aplicação.

4.5 Resumo ou Conclusões

Após estudar em pormenor, o importante conceito da resistividade do solo, procedeu-se ao estudo do outro ponto fulcral desta dissertação: a resistência de terra. Estes dois pontos juntos, resultam no tema geral da dissertação, calcular a resistência de terra em solos com camadas de diferentes resistividades.

Numa fase inicial do capítulo foi importante perceber em que é que consistia esta resistência, do que é que dependia e ainda algumas regras técnicas a que deve obedecer.

O facto de depender diretamente tanto da configuração dos eléctrodos como da resistividade do solo, fator conhecido por ser pouco exato e até variável de acordo com alturas do ano, permite facilmente prever que esta resistência não tem associada a si um cálculo trivial.

Inicialmente, a preocupação no decorrer de estudos realizados neste âmbito, impulsionados por *Dwight*, recaíram apenas na obtenção de equações para a determinação da resistência de terra, considerando diferentes tipos e configurações de eléctrodos. Deduziu equações desde as mais simples, para os eléctrodos hemisféricos e verticais até aos mais complexos, como eléctrodos com configuração em estrela com vários pontos.

No entanto, é sempre necessário complementar os estudos teóricos com a aplicação prática. Assim, são apresentados também neste capítulo os diferentes métodos de medir a resistência de terra, destacando-se o método da queda de potencial.

Com o intuito de tornar possível um estudo à priori de qualquer instalação, prevendo, por exemplo, a quantidade de eléctrodos que seria necessário instalar, os estudos que se seguiram tinham como objetivo central a obtenção de uma metodologia que proporcionasse o cálculo da resistência de terra com N eléctrodos, num solo heterogéneo. Isto porque, esta é considerada a situação que mais se aproxima da realidade.

Tal como foi referido, o estudo do cálculo da resistência de terra foi iniciado por *Dwight*. No entanto, e como este apenas proporcionava o cálculo para um eléctrodo único, *Schwarz* alongou o seu estudo a N eléctrodos, espaçados igualmente entre si, ao longo de uma determinada área. Mais tarde, surgiu *Nahman* que, apoiado nos estudos de *Schwarz*, alongou a sua aplicação a solos heterogéneos, a partir da consideração de um fator de não uniformidade do solo. Todavia, este fator foi a principal razão que levou a estes estudos, uma vez que a sua obtenção partia da análise de gráficos, tornando assim limitada a sua aplicabilidade. Por fim, dos estudos de *Chow* surgiu um novo método que calcula a resistência do solo a partir do paralelo das duas resistências para cada camada do solo.

Capítulo 5

Técnicas para Melhorar a Resistência de Terra

Dada a importância de um sistema de terras adequado, e como a resistência de terra obtida é, muitas vezes, superior ao desejado, é necessário estudar diferentes técnicas que possibilitem a melhoria desses valores. De uma forma geral, a resistência de terra diminui atuando nos valores da resistividade do solo nas proximidades dos elétrodos, ou ainda alterando as condições de enterramentos dos mesmos. Ao longo deste capítulo são enumeradas algumas dessas mesmas técnicas.

5.1 Técnicas baseadas na alteração das características dos elétrodos

Existem diferentes alterações nas características e configurações dos elétrodos que resultam numa diminuição da resistência de terra. Umas com maior relevância do que outras, são todas apresentadas nos pontos seguintes.

5.1.1 Aumento do número de elétrodos em paralelo

Esta técnica diminui bastante a resistência de terra com a única condição de estarem suficientemente afastados de forma a minimizar o efeito da resistência mútua entre elétrodos.

A Figura 5.1 mostra como varia a resistência de terra com o número de elétrodos colocados em paralelo. Estão representadas três curvas, para diferentes comprimentos e diâmetros de elétrodos.

Após uma breve análise, conclui-se, que após a instalação de um determinado número de elétrodos, a resistência diminui muito pouco, deixando de fazer sentido continuar a colocar mais elétrodos.

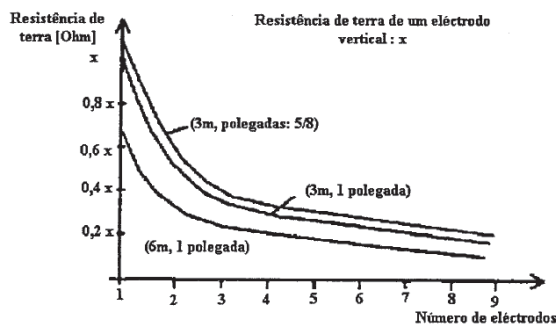


Figura 5.1: Variação da resistência de terra com o número de eletrodos verticais instalados em paralelo ($1\text{pol} = 0,0254\text{m}$) [4]

Em [24] são mostrados resultados de um estudo desta mesma técnica, mas tendo também em consideração o espaçamento entre os eletrodos. A Figura 5.2 mostra esse mesmo estudo comparativo.

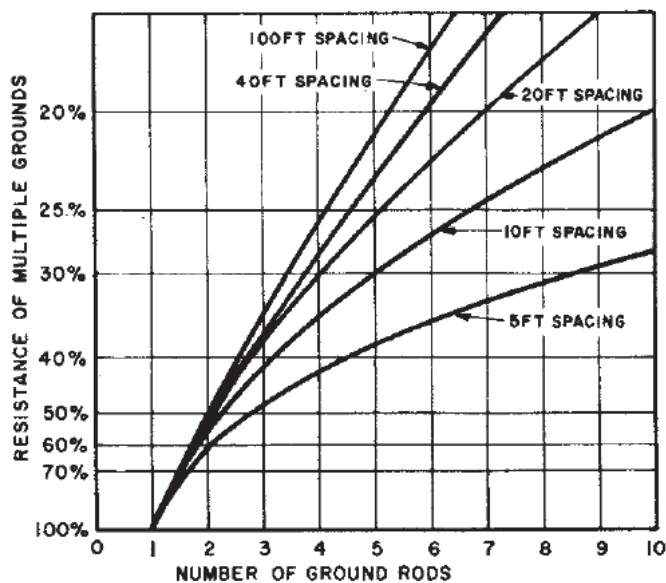


Figura 5.2: Variação da resistência de terra com o número de eletrodos em paralelo ($1\text{FT} = 0,3048\text{m}$) [24]

Em [24] conclui-se que para dois eletrodos espaçados de 10FT a resistência diminui cerca de 40% e aumentando o espaçamento para 20FT essa resistência diminui para 50%.

5.1.2 Aumento da profundidade de enterramento dos eletrodos

Esta técnica é bastante eficaz na aplicação de eletrodos verticais. Na Figura 5.3 é possível observar a variação da resistência de terra com a profundidade a que os eletrodos estão enterrados para dois casos distintos: um em que o solo é homogêneo e outro para um solo com duas camadas, sendo que a segunda apresenta uma menor resistividade.

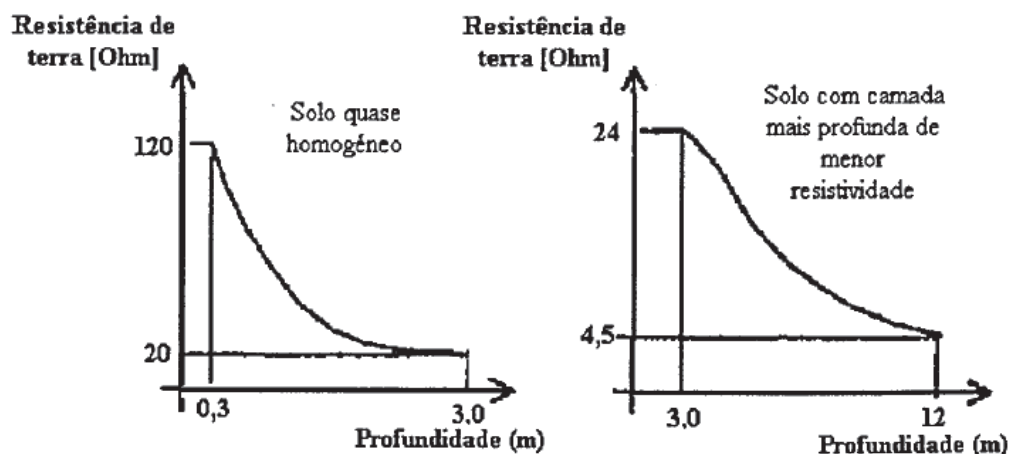


Figura 5.3: Variação da resistência de terra com a profundidade de enterramento dos eletrodos [4]

É fácil perceber que quando o solo apresenta duas camadas e a segunda tem um menor valor de resistividade, à medida que se aumenta a profundidade a que os eletrodos estão enterrados, a resistência de terra vai diminuir substancialmente. Assim, nestas situações, esta técnica é bastante eficaz. Pelo contrário, quando o solo é homogêneo, constata-se que a partir de uma determinada profundidade, a resistência diminui pouco. Em [4], afirma-se que acontece para profundidades superiores a 3,5m.

Ainda relativamente ao aumento da profundidade, em [20, 24] afirma-se que esta técnica pode diminuir a resistência de terra até cerca de 40%.

5.1.3 Aumento da secção dos eletrodo

Mais uma vez, analisando a Figura 5.1, é possível concluir, que quanto maior a área da secção do eletrodo, menor a resistência de terra. No entanto, esta alternativa nem sempre é considerada, uma vez que também influencia a resistência mecânica do eletrodo e a sua capacidade de escoar a corrente.

Em [20, 24] afirma-se que para um mesmo comprimento, duplicando o diâmetro do eletrodo, apenas é conseguida uma diminuição da resistência de terra em cerca de 10%. A Figura 5.4 mostra essa mesma variação da resistência com o aumento do diâmetro, em três estudos de autores diferentes.

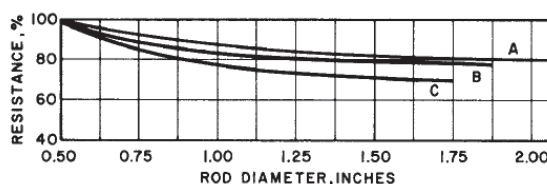


Figura 5.4: Variação da resistência de terra com o diâmetro dos eletrodos [24]

5.2 Técnicas para melhorar a resistividade do solo

Uma forma indireta de melhorar a resistência de terra, passa por melhorar a resistividade do solo, no qual a instalação vai ser efetuada. Isto porque, como já foi referido, a resistência de terra é diretamente proporcional à resistividade do solo. De seguida, são então enumeradas algumas dessas técnicas.

5.2.1 Tratamento químico do solo

Tal como já foi referido no Capítulo 3, a presença de sais na terra, diminui bastante a sua resistividade e, conseqüentemente, diminui a resistência de terra. Assim, é frequente, em sistemas de terra pequenos, adicionar sais (cloreto de sódio ou sulfato de cobre) na terra que envolve os eletrodos. Deve-se ter em atenção que os sais não fiquem diretamente em contacto com os eletrodos, para não correr o risco de corrosão. Esta técnica requer uma vigilância mais recorrente do valor da resistência de terra, uma vez que com o tempo o efeito destes sais pode desaparecer, devido à dispersão dos mesmos pelo solo. Em [4] afirma-se que com esta técnica, é possível obter uma redução da resistência de terra superior a 50% em sistemas de terra pequenos, e 15% em sistemas de terra de maior dimensão. Na Figura 5.5 está ilustrada uma possível aplicação desta técnica.

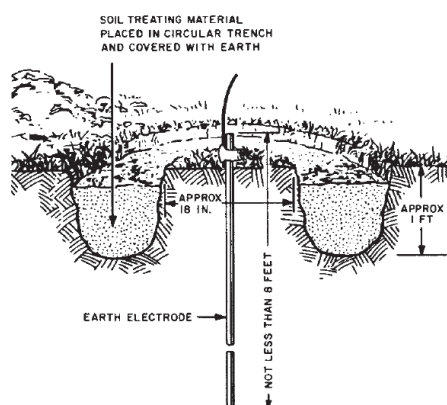


Figura 5.5: Ilustração de como efetuar um tratamento químico no solo [24]

Em [24] é ainda apresentado um estudo efetuado para averiguar como varia a resistência de terra ao longo do ano num solo com o tratamento químico e num solo normal. Na Figura 5.6 é possível observar os resultados obtidos para esta técnica.

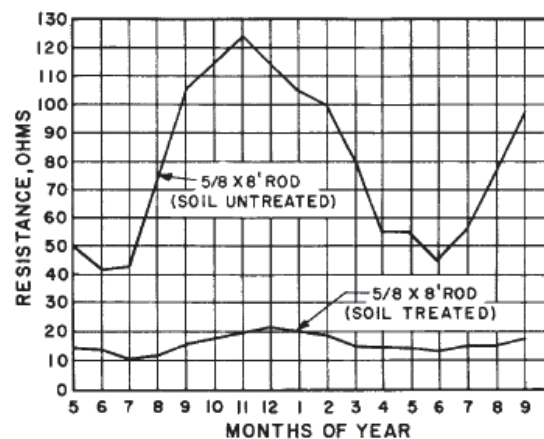


Figura 5.6: Variação da resistência de terra ao longo do ano, para um solo sem tratamento e outro com tratamento [24]

5.2.2 Tratamento físico do solo

Esta técnica consiste em envolver o eléctrodo em material condutor de baixa resistividade, conseguindo assim uma maior área de contacto deste com o solo, proporcionando assim uma diminuição da resistência de terra. Uma prática comum em terrenos com elevada resistividade, é a aplicação de bentonite em torno do eléctrodo. Uma das características que faz deste material uma forte aposta é o facto de concentrar elevados níveis de humidade e ainda proteger os eléctrodos contra a corrosão. [3,4] A Figura 5.7 ilustra esta técnica.

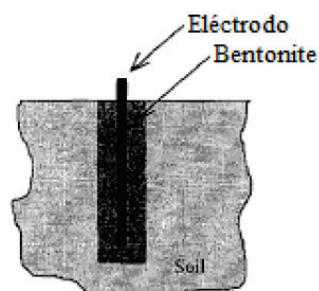


Figura 5.7: Ilustração da aplicação de bentonite à volta do eléctrodo (Adaptado de [25])

Mais recentemente, surgiu um composto para a melhoria dos valores das resistências de terra mais eficaz do que a bentonite. Designado por GEM (*Ground Enhancement Material*), este composto apresenta características muito fortes, tais como, alta condutividade, baixa resistência óhmica, não corrosivo e feito à base de pó de carbono. O facto de conter cimento Portland, que é um material que endurece logo após a sua instalação, significa que não irá necessitar de manutenção e que este nunca se irá dissolver no solo. O fator de resistividade do GEM é inferior a 1% do fator de resistividade da Bentonite [26].

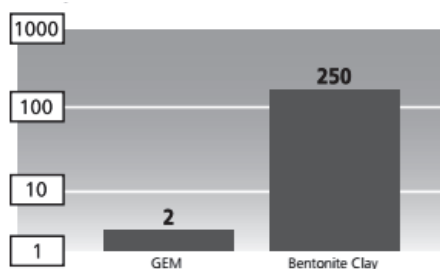


Figura 5.8: Resistividades características do GEM e da Bentonite [26]

Devido ao facto de os resultados obtidos com esta técnica serem bastante favoráveis, foram realizados diversos estudos com o intuito de obter metodologias de cálculo da resistência de terra num solo preenchido com este mesmo material. O resultado desse estudo pode ser observado em [26,27].

5.3 Outras técnicas sob estudo

A importância de melhorar a resistência de terra tem levado a contínuos estudos com o intuito de encontrar novos métodos. Uma vez que já foram testadas quase todas as alternativas, no que diz respeito ao tamanho e configuração dos eléctrodos, a principal aposta tem sido em estudar novas técnicas para diminuir a resistividade do solo.

5.3.1 Provocação de uma explosão na zona de enterramento dos eléctrodos

Em [28] é exposto um método distinto dos anteriores, para diminuir a resistividade do solo. De uma forma geral, este consiste em perfurar o solo no local onde se pretende colocar o eléctrodo, provocar uma pequena explosão, e preencher as fissuras resultantes da mesma com um material específico de baixa resistividade. Importa salientar, que os materiais de baixa resistividade são injetados nos furos sob alta pressão, para assim preencher todas as fissuras provocadas pela explosão. Esta pequena explosão deverá ser bem planeada para não danificar a superfície do solo, tal como ilustrado na Figura 5.9.

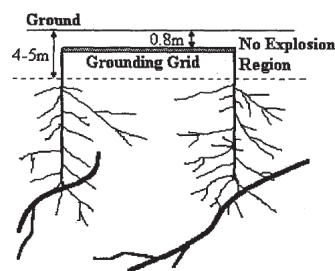


Figura 5.9: Ilustração do solo após a explosão [28]

As principais razões pela qual a resistência de terra diminuiu com a utilização deste método são:

- O desenvolvimento das fissuras que posteriormente são preenchidas com material de baixa resistividade;
- A possibilidade de criar uma ligação entre as fissuras provocadas pela explosão e as fissuras já existentes no solo, fazendo com que estas últimas fiquem também preenchidas com o material referido, diminuindo assim a resistividade do solo (Figura 5.10);

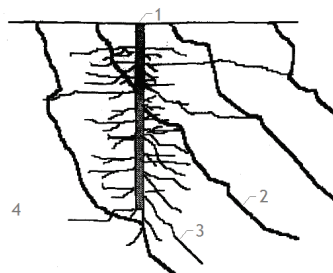


Figura 5.10: Esquema representativo das fissuras do solo (1) Eléttrodo; (2) Fissuras já existentes; (3) Fissuras provocadas pela explosão; (4) Solo. [28]

- A eventualidade de formar caminhos de ligação das fissuras criadas até camadas inferiores do solo que apresentem menor resistividade, utilizando assim essas camadas para diminuir a resistência de terra.

5.3.2 Escavação de um poço profundo

Em [29] é apresentado um novo método para diminuir a resistividade do solo, baseado no uso de um poço criado no mesmo até uma grande profundidade.

Numa primeira fase, o autor explica o princípio que faz com que o poço fique coberto de água. Faz parte do senso comum, que escavando um poço no solo, até determinada profundidade, a água presente, irá mover-se para dentro do poço. Tal facto, justifica-se pelas diferentes pressões em jogo. A pressão existente dentro do poço é apenas a pressão atmosférica (P_1) e a pressão de uma molécula de água presente a uma profundidade h é a pressão atmosférica mais a pressão exercida pelo solo a essa profundidade (P_2). Ou seja, $P_2 > P_1$ e assim, a molécula dirige-se para dentro do poço (Figura 5.11)

Será então criada uma zona de baixa resistividade na periferia do poço. Assim, surge a ideia de formar um tubo de metal nas paredes do poço que será o eléctrodo de terra. De forma a manter a diferença de pressões referidas e, consequentemente, mover a água para dentro do tubo, são efetuados pequenos furos no mesmo.

De um modo geral, este método consegue alcançar o objetivo de diminuir a resistência de terra, aumentando a humidade do solo na vizinhança do eléctrodo (Figura 5.12). Tal como foi referido

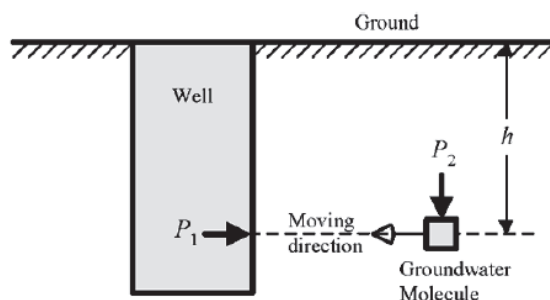


Figura 5.11: Diagrama representativo do movimento de uma molécula de água [29]

no Capítulo 3, este aumento da humidade do solo, diminui a resistividade e consequentemente a resistência de terra.

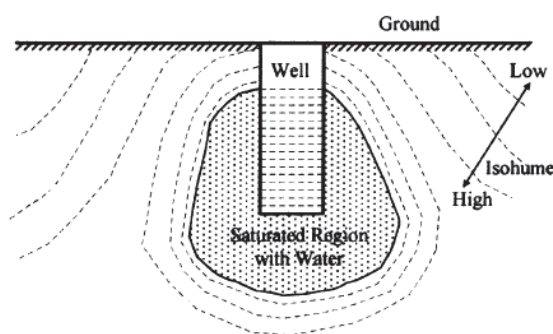


Figura 5.12: Região do solo saturada com água devido à presença do poço [29]

Este método já foi testado numa subestação na China e os resultados obtidos foram bastante satisfatórios.

5.4 Resumo e Conclusões

Tal como foi referido, é de uma importância extrema garantir que um sistema de terras cumpra todas as condições necessárias para ser considerado seguro, uma vez que é também a segurança das pessoas que está em causa. Assim, ao longo deste capítulo foram apresentadas diversas formas de melhorar a resistência de um sistema de terras, garantindo que esta se encontra dentro dos limites máximos.

De um modo geral, existem duas formas de melhorar a resistência de terra, uma consiste em alterar as características e configurações dos elétrodos e a outra, de uma forma indireta, consiste em melhorar a resistividade do solo no qual o sistema está instalado.

Relativamente à primeira opção, considera-se que já foram equacionadas grande parte das alternativas e que, com muitas delas, é possível diminuir bastante a resistência de terra. Essas mesmas alternativas vão ser testadas no próximo capítulo.

Pelo contrário, e apesar de já existirem diversas técnicas, considera-se uma forte aposta para o futuro, encontrar novas formas de melhorar a resistividade do solo no qual o sistema de terras vai ser instalado. Isto porque, melhorando a resistividade do solo, a resistência de terra diminui.

Capítulo 6

Aplicação dos métodos de cálculo da Resistência de Terra

Este capítulo surge com o objetivo de aplicar os conhecimentos adquiridos ao longo do vasto estudo do estado da arte, relativo ao cálculo teórico do valor da resistência de terra para as múltiplas possibilidades de configurações de elétrodos e solos, exposto anteriormente.

Encontra-se dividido essencialmente em dois grandes grupos. O primeiro tem como principal preocupação o estudo de solos com duas camadas, nos quais são aplicados modelos equivalentes em termos da sua resistividade. É aplicado então o conceito de Resistividade Aparente, apresentado no Capítulo 3.

Numa segunda fase são aplicados e comparados alguns dos métodos para calcular a Resistência de Terra, apresentados no Capítulo 4, com especial destaque para o facto de estes poderem ser aplicados em situações com N elétrodos.

6.1 Resistividade Aparente

No estudo realizado e apresentado neste ponto, foi aplicado o método geral referido no Capítulo 3. É de salientar que, por se tratar de um trabalho académico, a lógica adotada para o cálculo da resistividade aparente foi contrária à que, normalmente, é aplicada em casos práticos. Isto significa que, foram calculadas computacionalmente diferentes resistividades aparentes, para n medições, supondo valores para as resistividades das duas camadas do solo e ainda, para a altura da primeira camada. Em casos práticos, a lógica é inversa. São realizadas várias medições no terreno e, consoante os valores obtidos, são determinadas as resistividades existentes no solo, bem como a altura da primeira camada.

Para o estudo cujos resultados são apresentados de seguida, foi utilizada a Equação 3.13, apresentada aqui novamente pela Equação 6.1, de forma a facilitar a compreensão do restante capítulo.

$$\rho_a = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} \right] \quad (6.1)$$

6.1.1 Resultados

As principais preocupações para o estudo da resistividade aparente focaram-se em perceber como é que esta variava com o aumento do número de medições efetuadas, perceber qual a influência de cada camada no seu valor e ainda compreender as curvas de *Sunde* apresentadas no Capítulo 3, através de uma replicação das mesmas.

6.1.1.1 Variação da resistividade com o número de medições

Este estudo foi realizado para sete conjuntos de dois valores de resistividade distintos, fixando a altura da primeira camada em quatro metros e o espaçamento entre os elétrodos em dez metros. De seguida variou-se o número de medições, n , e calculou-se a resistividade aparente para cada um desses conjuntos.

O resultado deste estudo pode ser observado na Figura 6.1.

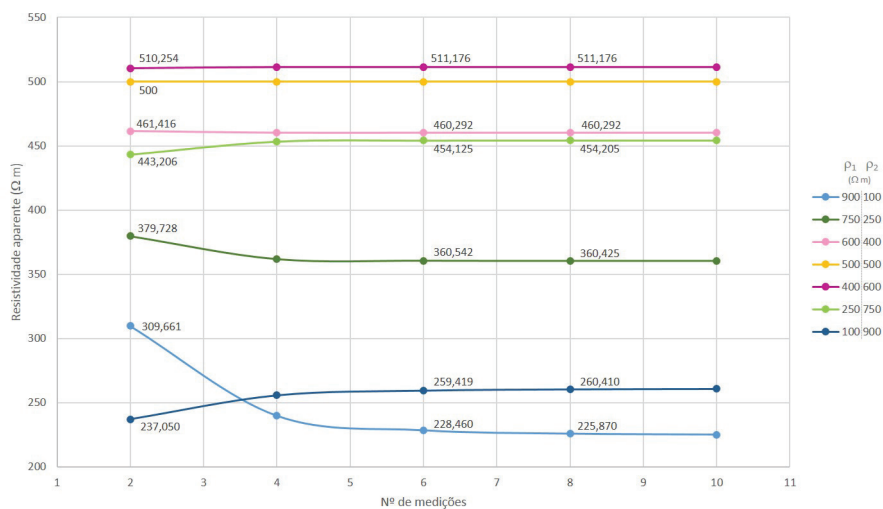


Figura 6.1: Variação da resistividade aparente com o número de medições efetuadas

Tal como se pode comprovar pela Figura 6.1, à medida que o número de medições aumenta, o valor da resistividade aparente tende para um determinado valor fixo, o que se verifica para qualquer um dos solos. Foi então considerado o valor obtido com seis medições como um valor credível para um futuro estudo da resistência de terra, uma vez que, na maioria dos casos, o valor encontrado para as seis medições não varia muito com o aumento das mesmas.

Destacam-se ainda algumas conclusões importantes. Em casos em que há uma maior discrepância entre as resistividades dos dois solos, são necessárias mais medições até o valor da resistividade aparente estabilizar. Isso é fácil de perceber, comparando as variações representadas na curva cujas resistividades são $\rho_1 = 100$ e $\rho_2 = 900$, representada a azul escuro, e na curva representada a cor de rosa escuro com $\rho_1 = 400$ e $\rho_2 = 600$.

Salienta-se ainda o facto de que, quando a resistividade do segundo solo é superior à do primeiro, $\rho_2 > \rho_1$, com o aumento do número de medições, a resistividade aparente também aumenta, vendo também o seu valor aumentar relativamente a ρ_1 . Pelo contrário, quando é o primeiro solo que apresenta maior resistividade, $\rho_1 > \rho_2$, com o aumento do número de medições, a resistividade aparente vê diminuir o seu valor, diminuindo também face a ρ_1 .

Por fim, é importante sublinhar ainda, a provável dificuldade em sentir a ação da segunda camada no cálculo (ou medição) da resistividade aparente e, por isso, a variação observada quando $\rho_2 > \rho_1$ ser mais lenta comparativamente à situação em que $\rho_1 > \rho_2$.

6.1.1.2 Influência de cada camada

Seguidamente, foi realizada uma análise à variação da resistividade aparente com o fator de reflexão, K , o mesmo que dizer para vários conjuntos de duas resistividades características de cada camada de solo. Foi utilizada uma amostra de dezassete fatores de reflexão e os valores de resistividade aparente resultantes para as seis medições já referidas ($n = 6$).

O resultado deste estudo está representado na Figura 6.2.

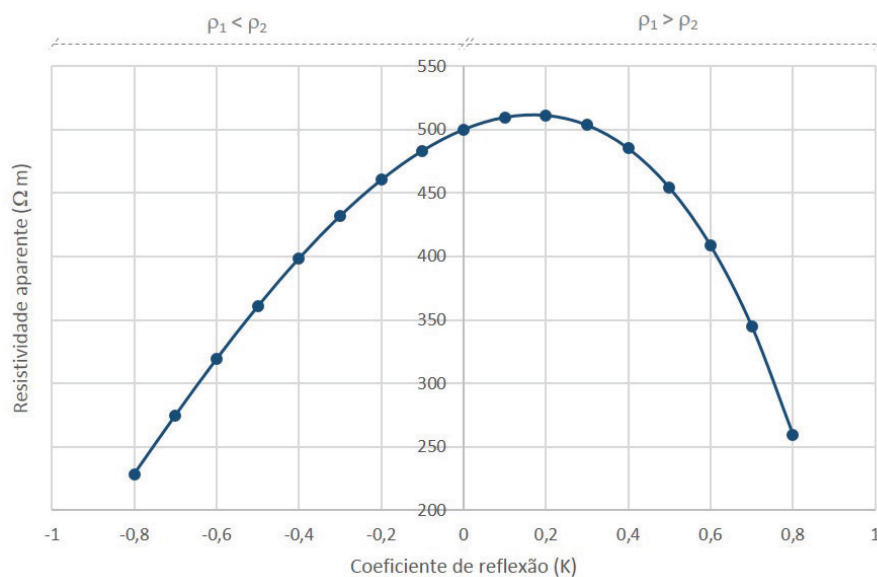


Figura 6.2: Variação da resistividade aparente com o fator de reflexão

A forma mais simples de interpretar este estudo é focar a atenção apenas em dois pontos complementares. É notória a diferença entre os valores da resistividade aparente dos pontos correspondentes aos fatores de reflexão $K = -0,8$ e $K = 0,8$, por exemplo. No entanto, estes pontos correspondem aos mesmos valores de resistividade dos solos, apenas trocados. Isto é, para o primeiro fator, $\rho_1 = 900$ e $\rho_2 = 100$ e para o segundo $\rho_1 = 100$ e $\rho_2 = 900$. O mesmo se verifica para os restantes valores de K .

É então possível concluir, que a influência da primeira camada no valor da resistividade aparente é muito superior à da segunda camada, tal como previsto.

6.1.1.3 Curvas de Sunde

Para reprodução de parte das curvas de *Sunde* apresentadas no Capítulo 3 foram utilizadas onze conjugações de dois valores de resistividade, obtendo fatores de reflexão de $K = -0,5$ até $K = 0,5$ (onze curvas).

A razão de $\frac{a}{h}$ presente no eixo dos xx , seguiu o princípio de fixar o valor da profundidade da primeira camada em quatro metros ($h = 4m$) e variar o espaçamento entre os elétrodos ($a = 0,4m$; $a = 2,5m$; $a = 5m$; $a = 25m$; $a = 200m$). No eixo dos yy é apresentada a razão entre a resistividade aparente para cada um dos espaçamentos, obtida ao fim das seis medições, e a resistividade do solo da primeira camada, $\frac{\rho_a}{\rho_1}$. As curvas resultantes correspondem à razão $\frac{\rho_2}{\rho_1}$.

Na Figura 6.3 estão representadas as curvas de *Sunde* e o resultado do estudo referido, sendo que este é apenas a ampliação de uma pequena zona das curvas originais.

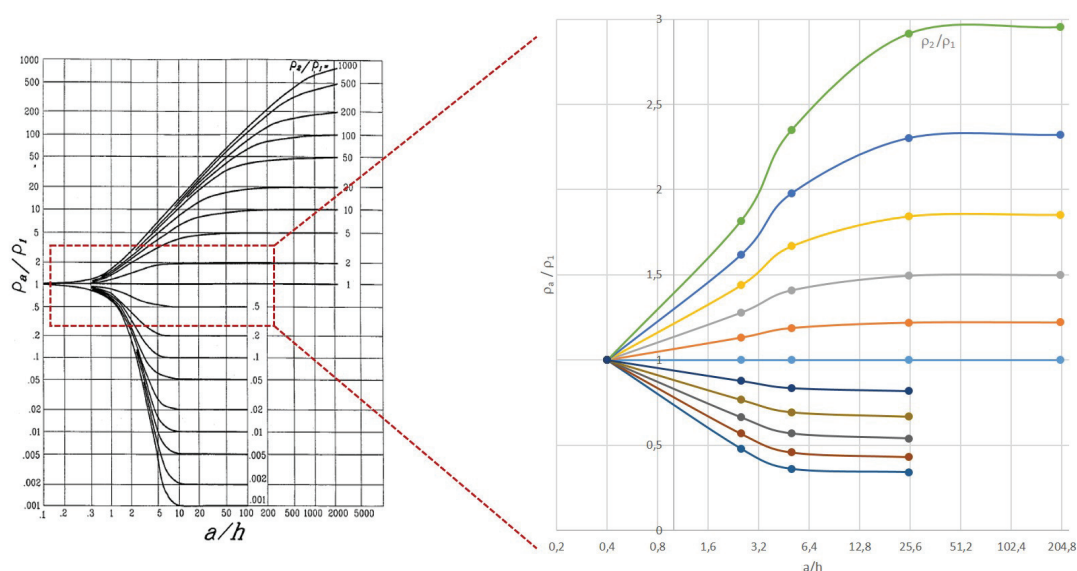


Figura 6.3: Ampliação da zona assinalada das curvas de *Sunde*

6.2 Resistência de Terra

Para o estudo realizado relativo à Resistência de Terra, foram aplicados os três métodos apresentados no Capítulo 4.

Os dois principais requisitos era que pudessem ser aplicados em solos heterogêneos, com duas camadas, e ainda que possibilitassem a colocação de N eletrodos, de modo a obter valores de resistência de terra aceitáveis.

No caso do método de *Schwarz*, e como já foi referido no Capítulo 4, este apenas pode ser aplicado em casos em que o solo é homogêneo. No entanto, surgiu uma ideia, de caráter inovador, de utilizar o conceito de resistividade aparente apresentado anteriormente e aplicá-lo ao método referido. Os restantes métodos escolhidos foram o método de *Nahman* e *Chow*.

Após uma breve análise comparativa das variáveis de *input* de cada um dos métodos, são apresentados os resultados dos estudos efetuados.

Estes estudos foram realizados com o intuito de perceber se, com este método de *Schwarz* modificado, os resultados obtidos iriam de encontro aos alcançados pelos restantes métodos.

6.2.1 Análise Comparativa

No capítulo 4 foram apresentados diferentes métodos que surgiram ao longo dos estudos realizados no âmbito dos sistemas de terra. Cada método depende de um conjunto de variáveis, algumas comuns entre eles, e outras que os distinguem relativamente aos resultados que originam. Na Tabela 6.1 estão assinaladas as variáveis utilizadas por cada método.

Tabela 6.1: Variáveis de entrada para cada um dos métodos

	<i>Schwarz</i>	<i>Nahman</i>	<i>Chow</i>
Tamanho do eletrodo (l)	x	x	x
Raio do eletrodo (a)	x	x	x
Número de eletrodos (N)	x	x	x
Área ocupada pelos eletrodos (A)	x	x	x ⁽³⁾
Resistividade do solo (r)	x	x	x
Profundidade de enterramento (h_g)			x
Profundidade da 1ª camada (h)			x
Fator de reflexão (K)			x
Coeficiente K_1 ⁽¹⁾	x	x	
Coeficiente K_p' ⁽²⁾		x	
Tamanho do eletrodo na 1ª camada (l)		x	
Tamanho do eletrodo na 2ª camada (l)		x	

Notas:

- (1) O cálculo de K_1 é realizado através da ferramenta de *software Matlab*;
- (2) Os valores de K_p' são obtidos através do gráfico;
- (3) A área neste método é dada em função do raio de um círculo com uma área correspondente. Este método também pode ser aplicado a esquemas em quadrado e/ou retângulo desde que o seu perímetro corresponda ao dado pelo raio do círculo.

6.2.2 Resultados

Para a realização dos vários estudos, foram considerados cinco solos distintos, com fatores de reflexão desde $K = -0,8$ até $K = 0,8$. No caso do método de *Nahman* a análise dos resultados é realizada apenas para um conjunto de quatro solos, uma vez que este tem a limitação de depender de uma variável empírica, que é retirada através da análise de um gráfico e no qual o valor máximo de K corresponde a 0,3.

Relativamente à resistividade aparente, foram utilizados os resultados obtidos no ponto anterior, resultante de seis medições.

As análises efetuadas prenderam-se fundamentalmente com modificações ao nível da configuração dos elétrodos. De acordo com o explicitado no Capítulo 5, mostrou-se pertinente estudar o comportamento dos três métodos sob estudo, ao aumentar o número de elétrodos instalados, o tamanho, o raio e a profundidade de enterramento dos mesmos e ainda a área ocupada na sua instalação.

6.2.2.1 Variação da resistência de Terra com o número de elétrodos

Ainda numa fase anterior ao estudo é simples perceber que à medida que se acrescentarem elétrodos, a resistência de terra vai diminuir. Isto porque, se estes forem colocados a uma distância suficientemente grande, de modo a que não seja criada uma resistência mútua entre eles, o número de elétrodos vai permitir um aumento no caminho por onde a corrente possa escoar. Por outro lado, se pensarmos em resistências convencionais, ao colocar várias resistências em paralelo obtém-se uma resistência equivalente menor que a nível individual.

Assim, para a estudo da variação da resistência de terra, à medida que se foram acrescentando elétrodos foram estipulados para as variáveis presentes na Tabela 6.2 os seguintes valores:

Tabela 6.2: Valores das variáveis fixas no decorrer do estudo

Variáveis fixas	
a	0,075 m
l	20 m
A	500 m ²
H	4 m
h_g	0,8 m

De seguida, variando o número de elétrodos para quatro, seis, oito e dez, foram registados os valores da resistência de terra resultantes para cada método de cálculo e representados graficamente, tal como evidenciam as Figuras 6.4 e 6.5.

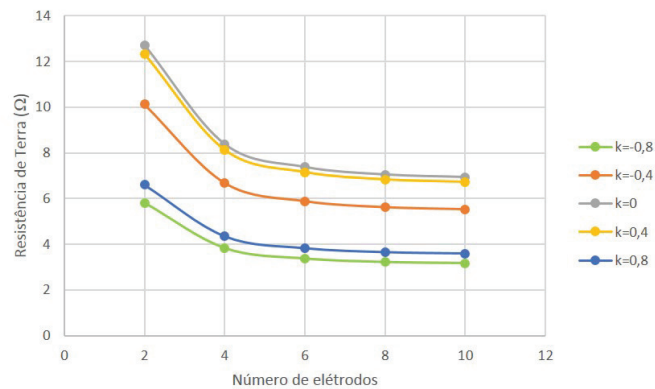


Figura 6.4: Variação da resistência de Terra com o número de elétrodos (Método de Schwarz)

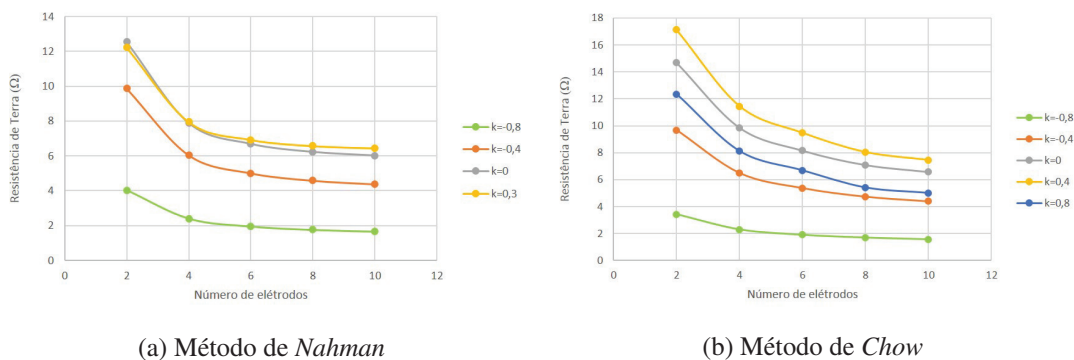


Figura 6.5: Variação da resistência de Terra com o número de elétrodos para os restantes métodos

Analisando as Figuras 6.4 e 6.5 confirma-se que a resistência de terra vai diminuindo à medida que se vão acrescentando elétrodos, sendo que o valor desta tende para um determinado valor fixo. Isto significa que, a partir de um certo número de elétrodos, mesmo que se continuem a acrescentar mais, a resistência de terra não vai diminuir significativamente. Na eventualidade de o valor desta ainda não estar dentro dos limites mínimos, será necessário adotar outras medidas.

É importante destacar o facto de os resultados obtidos através do método de Schwarz modificado, Figura 6.4 estarem muito próximos dos dos restantes métodos.

6.2.2.2 Variação da resistência de Terra com o tamanho dos elétrodos

Para o estudo da influência do tamanho dos elétrodos, no valor da resistência de terra fixaram-se as variáveis presentes na Tabela 6.3 com os respetivos valores, e variou-se o tamanho dos elétrodos.

Tabela 6.3: Valores das variáveis fixas no decorrer do estudo

Variáveis fixas	
N	2
a	0,075 m
A	500 m ²
H	4 m
h_g	0,8 m

Os resultados obtidos variando o comprimento dos elétrodos para $l = 5m$, $l = 10m$, $l = 15m$ e $l = 20m$ estão representados, para cada um dos métodos, nas Figuras 6.6 e 6.7. A mesma análise tinha sido observada no Capítulo 5 e os resultados obtidos foram bastante semelhantes, no que diz respeito ao comportamento global do estudo e não aos valores obtidos.

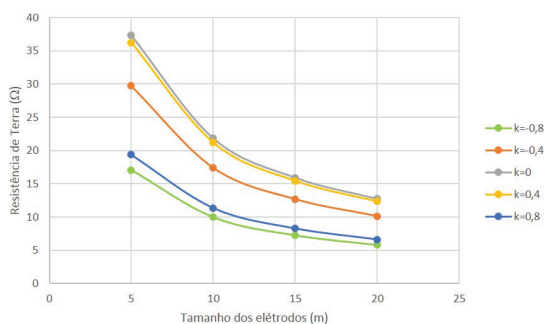
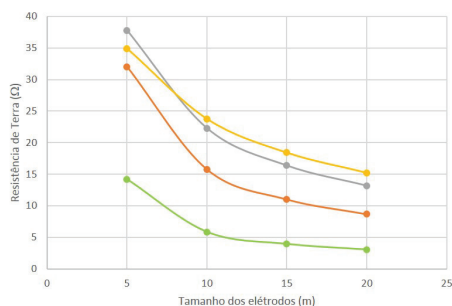
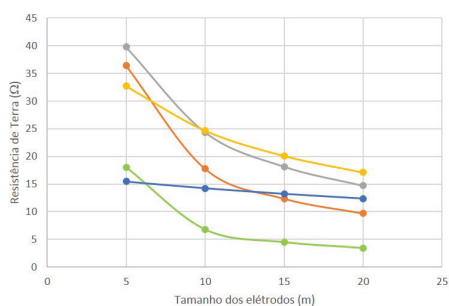


Figura 6.6: Variação da resistência de Terra com o tamanho dos elétrodos (Método de Schwarz)



(a) Método de Nahman



(b) Método de Chow

Figura 6.7: Variação da resistência de Terra com o tamanho dos elétrodos para os restantes métodos

Tal como se verifica nas Figuras 6.6 e 6.7 quanto maior o tamanho do eletrodo, menor é a resistência de terra. É fácil perceber esta tendência, uma vez que há mais caminho para escoar a corrente.

Nos métodos de Nahman e Chow é notório que quando a resistividade da segunda camada é inferior, ou seja para valores de $K = -0,8$ e $K = -0,4$, a variação da resistência de terra com

o aumento do tamanho do eléctrodo é mais acentuada. Este comportamento deve-se ao facto de se ter fixado sempre a mesma proporção do eléctrodo na primeira camada, e assim, o aumento do comprimento global do eléctrodo, resulta num aumento da parte deste que se encontrava enterrado na segunda camada. Assim, como a percentagem do eléctrodo que se encontra na segunda camada, com menor resistividade, é maior, a resistência de terra diminui. No método de *Schwarz* modificado não é possível salientar esta conclusão, uma vez que este trata o solo como um solo homogéneo, substituindo o valor da resistividade pela resistividade aparente dada pelo conjunto das duas camadas. Assim não é perceptível a influência da segunda camada, com o aumento do tamanho do eléctrodo.

No entanto, de uma forma geral, pode dizer-se que o método de *Schwarz* modificado apresenta bons resultados, uma vez que são muitos semelhantes aos dos restantes métodos.

É importante referir que, apesar de na generalidade dos casos, o tamanho dos eléctrodos utilizados ser menor do que os aqui testados, os eléctrodos possuem a particularidade de serem extensíveis. Ou seja, é possível colocar um eléctrodo em série, tal como na Figura 6.8, resultando assim num eléctrodo com maior comprimento.

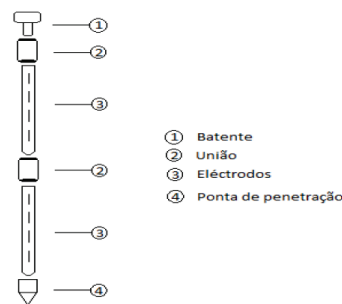


Figura 6.8: Ilustração da colocação de dois eléctrodos verticais unidos

6.2.2.3 Variação da resistência de Terra com o raio dos eléctrodos

O próximo estudo diz respeito à variação da resistência de terra, com o aumento do raio dos eléctrodos e, consequentemente, da sua secção. Como referido no capítulo 5, é expectável que a resistência diminua, mas em pequena proporção. Mais uma vez, fixaram-se as restantes variáveis, nos seguintes valores (Tabela 6.4).

Tabela 6.4: Valores das variáveis fixas no decorrer do estudo

Variáveis fixas	
N	2
l	20 m
A	500 m ²
H	4 m
h_g	0,8 m

Apesar de, na maioria dos casos, os elétrodos apresentarem uma secção muito pequena, neste estudo foram atribuídos três valores dentro da ordem de grandeza normal e um último valor muito superior, apenas para ter uma melhor percepção que a influência deste parâmetro não é substancial no valor da resistência de terra.

Os resultados para a resistência de terra, obtidos para valores de $a = 0,02m$, $a = 0,05m$, $a = 0,075m$ e $a = 0,5m$ estão representados graficamente, para cada um dos métodos, nas Figuras 6.9 e 6.10.

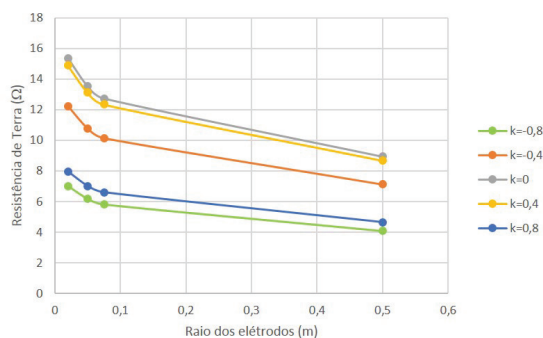
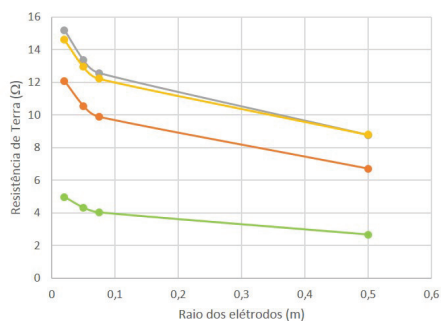
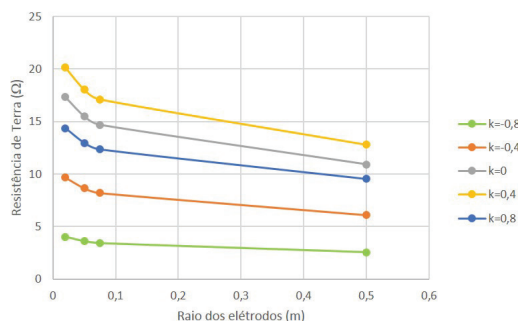


Figura 6.9: Variação da resistência de Terra com o raio dos elétrodos (Método de Schwarz)



(a) Método de Nahman



(b) Método de Chow

Figura 6.10: Variação da resistência de Terra com o raio dos elétrodos para os restantes métodos

Analisando as Figuras 6.9 e 6.10, conclui-se que o resultado foi ao encontro do que era previsto. Regista-se uma diminuição da resistência de terra mas com uma cadência pouco significativa. Nos três primeiros valores representados em cada gráfico que, como já foi referido, são os mais comuns, a resistência de terra sofre uma diminuição muito suave. É ainda interessante reparar que, mesmo com o valor utópico de $a = 0,5m$, a resistência continua sem sofrer uma diminuição substancial.

Uma vez mais, o método de Schwarz modificado revela-se uma excelente alternativa, na medida em que os valores obtidos foram muito semelhantes aos dos outros métodos e o comportamento verificado aquando da variação do raio dos elétrodos é também análogo.

6.2.2.4 Variação da resistência de Terra com a área ocupada pelos eletrodos

Outro fator muito importante, aquando da instalação de um sistema de terras, é a área que está disponível para a mesma. Assim, optou-se por estudar a variação da resistência de terra para diferentes áreas. As restantes variáveis foram fixadas com os valores presentes na Tabela 6.5.

É importante referir que neste estudo, foram utilizados dez eletrodos, de forma a facilitar a percepção da evolução do valor da resistência. Isto porque, a variação da área traduz-se também numa variação do espaçamento entre os eletrodos.

Tabela 6.5: Valores das variáveis fixas no decorrer do estudo

Variáveis fixas	
N	10
a	0,075 m
l	20 m
H	4 m
h_g	0,8 m

Assumindo quatro valores de área, $A = 50m^2$, $A = 100m^2$, $A = 200m^2$ e $A = 500m^2$, obtiveram-se as representações gráficas das Figuras 6.11 e 6.12.

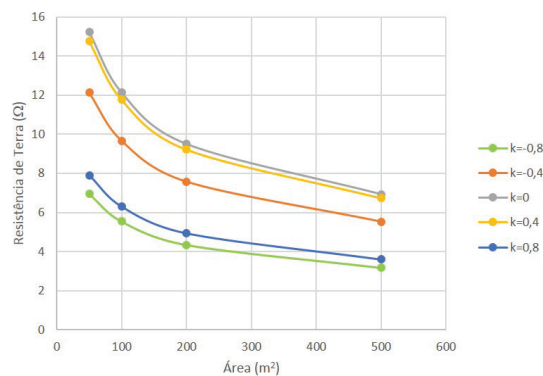
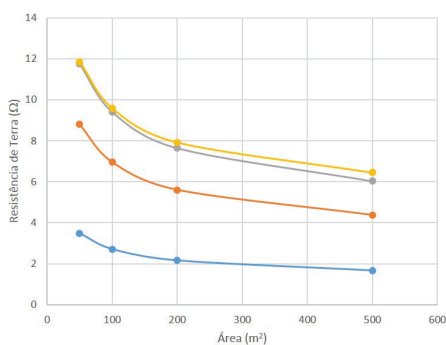
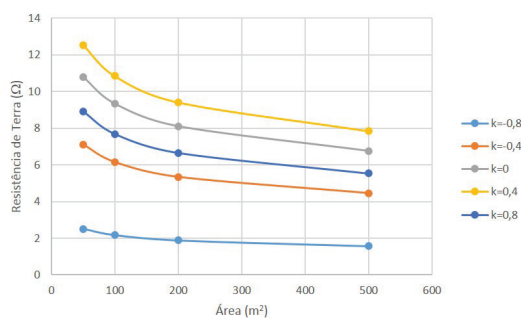


Figura 6.11: Variação da resistência de Terra com área ocupada pelos eletrodos (Método de Schwarz)



(a) Método de Nahman



(b) Método de Chow

Figura 6.12: Variação da resistência de Terra com área ocupada pelos elétrodos para os restantes métodos

Através da análise das Figuras 6.11 e 6.12 pode concluir-se que, à medida que a área aumenta a resistência de terra diminui. Uma possível justificação para esta diminuição é o facto de os elétrodos numa área superior, se encontrarem mais afastados e assim, diminuir a interferência, ou seja, a resistência entre eles, e por conseguinte, diminuir a resistência de terra.

Neste estudo, o método de Schwarz modificado apresenta valores ligeiramente superiores. No entanto, fazendo um balanceamento entre as vantagens deste método e o erro que lhe está provavelmente associado, considera-se esse erro desprezável.

6.2.2.5 Variação da resistência de Terra com a profundidade de enterramento dos elétrodos

O estudo da influência da profundidade de enterramentos dos elétrodos no valor da resistência de terra, apenas foi possível realizar para o método de Chow, uma vez que este é o único que considera a variável h_g . Os valores das restantes variáveis assumiram os valores presentes na Tabela 6.6.

Tabela 6.6: Valores das variáveis fixas no decorrer do estudo

Variáveis fixas	
N	10
a	0,075 m
l	20 m
H	4 m
A	500 m ²

Os resultados obtidos para a resistência de terra no método de Chow, após variar a profundidade de enterramento pelos seguintes valores, $h_g = 0,8m$, $h_g = 1,5m$, $h_g = 2m$ e $h_g = 3m$, estão representados na Figura 6.13.

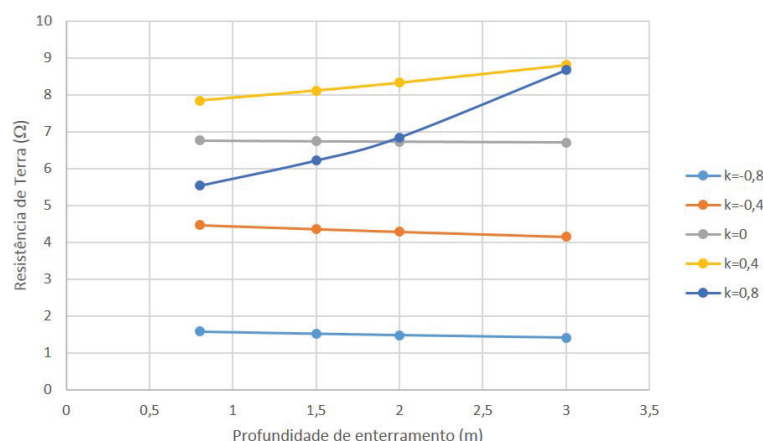


Figura 6.13: Variação da resistência de Terra com a profundidade de enterramento dos elétrodo, para o método de *Chow*

Neste estudo, é interessante reparar que o aumento da profundidade, contrariamente aos testes anteriores, tanto aumenta como diminui a resistência de terra. Para valores de K positivos, ou seja $\rho_2 > \rho_1$, à medida que a profundidade de enterramento aumenta, significa que o elétrodo passa a estar maioritariamente na segunda camada, e como esta tem uma resistividade elevada, a resistência de terra aumenta. Pelo contrário, se $\rho_2 < \rho_1$, aumentando a profundidade de enterramento a resistência de terra diminui, uma vez que uma maior percentagem do elétrodo passa a estar num solo com uma resistividade inferior. Este estudo vem comprovar o que foi apresentado no capítulo 5 e ainda completá-lo para casos em que a resistividade do segundo solo é superior.

6.2.3 Aplicação em *Excel*

De forma a tornar este estudo um pouco mais prático, foi criada, em *Excel*, uma folha de cálculo, apoiada no método de *Schwarz* que possibilita o cálculo da resistência de terra. O objetivo desta folha de cálculo passa por possibilitar a um utilizador comum, desconhecedor do método matemático por detrás deste estudo, o cálculo do valor da resistência de terra que poderá obter num determinado solo e com elétrodo com determinadas características.

Na Figura 6.14 está representada essa mesma folha.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												

Figura 6.14: Ilustração da folha de cálculo criada em Excel

De salientar o facto de se tratar de uma aplicação prática, e assim os valores da resistividade resultarem também eles de medições práticas, ou seja, no próprio local de implementação do sistema de terras. Os restantes dados dizem respeito às características e configuração dos eléktodos.

Introduzindo os dados na folha de cálculo, é então calculado o valor de resistência de terra que resultará dessa implementação.

6.3 Resumo ou Conclusões

Tal como já foi referido, este capítulo serviu para comprovar todo o estudo teórico que foi efetuado. Assim, e tal como esse mesmo estudo teórico, este capítulo estudou numa primeira fase a resistividade do solo e por fim a resistência de terra.

Relativamente ao estudo e aplicação do método geral da resistividade do solo, concluiu-se que à medida que se vão efetuando mais medições, o valor da resistividade tende para um determinado valor fixo. De salientar ainda que, quanto maior a diferença entre as resistividades dos dois solos, mais medições é necessário realizar até a resistividade estabilizar. Ainda assim, entendeu-se que para seis medições os valores obtidos eram aceitáveis. No segundo estudo efetuado, foi possível comprovar que, tal como era previsível, a primeira camada tem uma maior influência no valor da resistividade.

No que diz respeito à resistência de terra, o estudo efetuado foi mais completo. Dos três métodos apresentados no Capítulo 4, dois deles estavam em condições de ser aplicados no caso de estudo: sistemas de terra com N eléktodos em solos heterogéneos. O terceiro método, o método de Schwarz não podia ser aplicado em solos heterogéneos. Surgiu então a ideia de adaptá-lo utilizando o conceito de resistividade aparente estudado.

O primeiro estudo realizado consistiu em aumentar o número de eléktodos instalados e verificou-se que esta medida provoca uma diminuição significativa da resistência de terra. De salientar que deverá existir um compromisso entre o número de eléktodos instalados e a área disponível, uma vez que caso a área seja pequena para a quantidade de eléktodos, originará uma resistência mútua que irá aumentar a resistência de terra.

De seguida, variou-se o tamanho dos eléktodos e também com esta medida se verificou que quando maior o tamanho do eléktrodo, menor será o valor da resistência de terra. Isto verifica-se, uma vez que a corrente tem um maior caminho para percorrer. Esta medida é, a par do aumento do número de eléktodos, uma das mais eficazes.

Em contrapartida, constatou-se que a variação do raio dos eléktodos, não apresenta um efeito tão significativo. Tal como no aumento do comprimento, com o aumento do raio do eléktrodo, também aumenta o caminho para a passagem da corrente, e como resultado a resistência de terra diminui.

Outro estudo que foi realizado está relacionado com a área na qual os eléktodos estão instalados. Verificou-se que, para um mesmo número de eléktodos, aumentando a área, o espaçamento entre os eléktodos também aumenta e, como resultado, a resistência de terra diminui.

Por fim, analisou-se o impacto de aumentar a profundidade de enterramento dos eléktodos, apenas para o método de *Chow*, uma vez que os restantes métodos não consideram essa possibilidade. Verificou-se que em casos em que a resistividade da segunda camada do solo é inferior, aumentando a profundidade de enterramento, o eléktrodo passa a estar em maior percentagem nesse meio e a resistência de terra diminui. Pelo contrário, se a resistividade da segunda camada for superior, à medida que a profundidade de enterramento aumenta, a resistência de terra também aumenta.

De um modo geral, concluiu-se que o método de *Schwarz* modificado apresenta resultados muito semelhantes aos restantes métodos, apresentando ainda a vantagem de ser muito mais simples computacionalmente.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

Ao finalizar esta dissertação, e fazendo uma perspectiva de todo o trabalho realizado, é possível salientar alguns pontos importantes desta temática assim como algumas conclusões técnicas relacionadas diretamente com a análise de resultados obtidos. Assim, e depois de uma vasta pesquisa bibliográfica, os capítulos 2, 3 e 4 permitem salientar a importância do dimensionamento de uma resistência de terra ao nível da segurança de indivíduos, sintetizar alguns dos métodos estudados para o cálculo à priori da resistência de terra, assim como métodos de cálculo e medição da resistividade do solo.

As principais conclusões práticas desta dissertação são retiradas do Capítulo 6, uma vez que é neste que são efetuados estudos para situações mais próximas das que poderão ocorrer na realidade de uma instalação elétrica.

No que diz respeito à resistividade do solo, concluiu-se que é muito importante realizar várias medições, com espaçamentos diferentes e em várias direções, uma vez que apenas a partir da sexta medição é que os valores medidos deixam de variar substancialmente. É também evidente, através do estudo realizado, que a primeira camada tem uma maior influência no valor da resistividade.

No que concerne ao estudo realizado para a resistência de terra, apenas foram testadas alterações relativas às características dos elétrodos. Não foram testadas as medidas apresentadas no Capítulo 5 relativas à resistividade do solo, uma vez que é computacionalmente impossível por se tratarem de medidas unicamente práticas.

No primeiro e principal estudo, relativo ao aumento do número de elétrodos, concluiu-se que a resistência de terra diminui significativamente, comprovando a constante afirmação de que um sistema de terra, quase nunca é constituído por apenas um eletrodo. Concluiu-se também que a partir de determinado número de elétrodos, é dispensável instalar mais elétrodos, uma vez que a diminuição deixa de ser significativa. Para além disso, constatou-se que o número de elétrodos e a área devem estar em conformidade, uma vez que muitos elétrodos, numa área pequena, pode originar um aumento da resistência de terra. Uma possível razão para isto acontecer é o facto de serem criadas resistências entre elétrodos por estes se encontrarem muito próximos.

No estudo realizado para a variação da área concluiu-se isso mesmo. Aumentando a área, o espaçamento entre os elétrodos também aumenta e, como resultado, a resistência de terra diminui.

Relativamente aos estudos realizados com a alteração das características dos elétrodos, nomeadamente no tamanho e raio, concluiu-se que com o aumento de ambos resulta uma diminuição da resistência de terra. No entanto, o comprimento do eléctrodo tem uma maior influência, muito possivelmente porque, para além de aumentar o caminho por onde a corrente pode escoar, como no aumento do raio acontece, em casos em que a resistividade da segunda camada é inferior uma maior percentagem do eléctrodo passa a estar em contacto com um solo melhor.

Na mesma ordem de ideias, com o aumento da profundidade de enterramento, a variação da resistência de terra deve ser também considerada por permitir estudar a sua evolução face a percentagens de contacto diferentes com camadas de resistividades também elas distintas. No estudo realizado, concluiu-se que quando a resistividade do segundo solo é superior, aumentar a profundidade de enterramento não é aconselhável, uma vez que aumenta a resistência de terra. Pelo contrário, quando a resistividade da segunda camada é inferior, o aumento da profundidade de enterramento é uma medida bastante eficaz de melhorar a resistência de terra.

Estes estudos foram realizados para três métodos, um dos quais adaptado nesta dissertação, para poder ser aplicado ao caso de estudo.

De um modo geral, concluiu-se que esse método, baseado no método de *Schwarz*, apresenta resultados muito semelhantes aos restantes métodos, revelando-se por isso uma forte alternativa. É ainda importante destacar o facto de ser muito menos complexo computacionalmente, mais expedito e de mais fácil aplicabilidade.

Finalizada esta dissertação, pode aferir-se, e em tom de satisfação, que foram cumpridos todos os objetivos inicialmente estipulados. Além disso, a obtenção de um novo método para o cálculo da resistência de terra à priori da instalação, revelou-se um incremento nesses mesmos objetivos, mostrando ser uma mais-valia ao trabalho desenvolvido.

7.1 Trabalhos Futuros

O tema apresentado nesta dissertação, surge normalmente com um rótulo de ser bastante ambíguo, imprevisível, discutível e, como consequência, alvo de pouco estudo. Assim, e depois de um trabalho extenso como o que foi aqui apresentado, surgem naturalmente novas metas e novos objetivos do que aqueles estipulados à priori.

Atentando naquilo que foi desenvolvido nesta dissertação, e tentando perceber como é que seria possível melhorá-lo, tornando-o mais completo, ou apenas mais preciso, destacam-se alguns pontos de interesse aos quais, em trabalhos futuros, seria de relevância dar continuidade:

- **Estudo de solos com mais do que duas camadas e orientações não horizontais**- este primeiro ponto revela-se bastante importante, uma vez que, na maioria das vezes, os solos são bastante mais imprevisíveis do que o que foi considerado nesta dissertação. Assim, seria importante perceber quais as implicações de um solo, com camadas de orientação aleatória de diferentes resistividades, no valor da resistência de terra;

- **Interpolação de alguns valores gráficos como por exemplo no método de *Nahman***- neste caso, esta interpolação tornaria o método de *Nahman* mais preciso, garantindo uma melhor fiabilidade e coerência aos resultados por ele obtidos. A comparação com o método criado nesta dissertação seria também mais correta.
- **Extensão do estudo a outros tipos e configurações de elétrodo**- Ao longo do trabalho foram apresentados vários tipos e configurações de elétrodo, mas o estudo relativo aos métodos de cálculo da resistência de terra apenas foi efetuado para elétrodo verticais. Num futuro estudo, seria interessante realizar algo semelhante para outros elétrodo.
- **Aplicação da análise e estudo efetuado a um caso prático considerado pertinente**- Uma aplicação prática, resulta sempre numa validação mais exata dos resultados teóricos obtidos, revelando-se assim bastante pertinente a realização deste ponto.

Referências

- [1] Ieee guide for safety in ac substation grounding. *IEEE Std 80-2000*, páginas i–192, 2000. doi:10.1109/IEEESTD.2000.91902.
- [2] Francisco Silva. Projeto otimizado de redes de terra em subestações. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, jul 2012.
- [3] Fernando Teixeira. Modelização de eléctrodos de terra em sistemas eléctricos de energia. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2000.
- [4] Silvério Visacro Filho. *Aterramentos Elétricos*. Artliber, 2002.
- [5] C. Prabhakar e R.A Deshpande. Evaluation of soil resistivity and design of grounding system for hydroelectric generating station in a hilly terrain #x2014; a case study. Em *Advances in Energy Conversion Technologies (ICAECT), 2014 International Conference on*, páginas 104–107, Jan 2014. doi:10.1109/ICAECT.2014.6757070.
- [6] L.M.Vilela Pinto. *MGCALC*. Edição Merlin Gerin, second edição, 1996.
- [7] OBO-Bettermann. *Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas e Sistema de Terras*, 2012.
- [8] Ieee guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system part 1: Normal measurements. *IEEE Std 81-1983*, páginas 1–44, March 1983. doi:10.1109/IEEESTD.1983.82378.
- [9] N. Mohamad Nor, R. Rajab, e Z. Othman. Validation of the earth resistance formulae using computational and experimental methods for gas insulated sub-station (gis). *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 43(1):290 – 294, 2012. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061512001834>, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.04.056.
- [10] P.-J. Lagace, Mai-Hoa Vuong, Mario Lefebvre, e Jacques Fortin. Multilayer resistivity interpretation and error estimation using electrostatic images. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 21(4):1954–1960, Oct 2006. doi:10.1109/TPWRD.2006.874618.
- [11] Gary Gilbert. Soil modelling techniques. *International Journal of Materials Science and Applications*, Vol. 1(No. 1):pp. 8–13, 2012.
- [12] A Puttarach, N. Chakpitak, T. Kasirawat, e C. Pongsriwat. Substation grounding grid analysis with the variation of soil layer depth method. Em *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*, páginas 1881–1886, July 2007. doi:10.1109/PCT.2007.4538604.

- [13] J. A Sullivan. Alternative earthing calculations for grids and rods. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, 145(3):271–280, May 1998. doi:10.1049/ipgtd:19981696.
- [14] F. Dawalibi e C. J. Blattner. Earth resistivity measurement interpretation techniques. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-103(2):374–382, Feb 1984. doi:10.1109/TPAS.1984.318254.
- [15] Hans R. Seedher e J.K. Arora. Estimation of two layer soil parameters using finite wenner resistivity expressions. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 7(3):1213–1217, Jul 1992. doi:10.1109/61.141833.
- [16] J. L. Del Alamo. A comparison among eight different techniques to achieve an optimum estimation of electrical grounding parameters in two-layered earth. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 8(4):1890–1899, Oct 1993. doi:10.1109/61.248299.
- [17] Gary Gilbert. *High Voltage Grounding Systems*. Tese de doutoramento, University of Waterloo, 2011.
- [18] EDP Distribuição- Energia, S.A. *Guia Técnico de Terras*, 2010.
- [19] H.B. Dwight. Calculation of resistances to ground. *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the*, 55(12):1319–1328, Dec 1936. doi:10.1109/T-AIEE.1936.5057209.
- [20] AEMC Instruments. *Ground Resistance Testing*, 2013.
- [21] Nuno Filipe Barbosa Coelho. Eléctrodos de terra. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, jan 2011.
- [22] S. J. Schwarz. Analytical expressions for the resistance of grounding systems [includes discussion]. *Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 73(2):–, Jan 1954. doi:10.1109/AIEEPAS.1954.4498923.
- [23] J.M. Nahman e V.B. Djordjevic. Resistance to ground of combined grid-multiple rods electrodes. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 11(3):1337–1342, Jul 1996. doi:10.1109/61.517488.
- [24] Megger. *Getting Down to Earth- A practical guide to earth resistance testing*, 2010.
- [25] S. Bourg, B. Sacepe, e T. Debu. Deep earth electrodes in highly resistive ground: frequency behaviour. Em *Electromagnetic Compatibility, 1995. Symposium Record., 1995 IEEE International Symposium on*, páginas 584–589, Aug 1995. doi:10.1109/ISEMC.1995.523625.
- [26] ERICO. *GEM- Ground Enhancement Material*, 2013.
- [27] Lan Ngo Kim Chuong Ho Van Nhat, Tung Nguyen Thanh. Formulas for calculating grounding resistance of simple forms with ground enhancement material. Em *International Journal of Automation and Power Engineering (IJAPE)*, 2013.
- [28] Qingbo Meng, Jinliang He, F.P. Dawalibi, e J. Ma. A new method to decrease ground resistances of substation grounding systems in high resistivity regions. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 14(3):911–916, Jul 1999. doi:10.1109/61.772333.

- [29] Jinliang He, Gang Yu, Jingping Yuan, Rong Zeng, Bo Zhang, Jun Zou, e Zhicheng Guan. Decreasing grounding resistance of substation by deep-ground-well method. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 20(2):738–744, April 2005. doi:10.1109/TPWRD.2005.844301.